

**PENGARUH VARIASI AGREGAT KASAR PENYUSUN BETON
TERHADAP KERAPATAN BETON DENGAN MENGGUNAKAN
PULSE VELOCITY PADA ALAT UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)**

**SKRIPSI
TEKNIK SIPIL**

**Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**ENGGIE AYU HERMA PUTRI
NIM. 155060101111007**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2018**

LEMBAR PENGESAHAN

PENGARUH VARIASI AGREGAT KASAR PENYUSUN BETON TERHADAP KERAPATAN BETON DENGAN MENGGUNAKAN PULSE VELOCITY PADA ALAT UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

SKRIPSI

TEKNIK SIPIL KONSENTRASI STRUKTUR

Diajukan untuk memenuhi sebagian
persyaratan memperoleh gelar Serjana Teknik



Disusun oleh:

ENGIE AYU HERMA PUTRI

155060101111007

Skripsi ini telah dinyatakan lulus dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 20 Desember 2018

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Indradi W., ST, M.Eng (Prac)
NIP.19810220 200604 1 002

Ir. Sugeng P. Budio, MS, IPM
NIP. 19610125 198601 1 001

Mengetahui
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng Indradi W, ST, M.Eng (Prac)
NIP. 19810220 200604 1 002

HALAMAN IDENTITAS PENGUJI SKRIPSI

Judul Skripsi :

Pengaruh Variasi Agregat Kasar Penyusun Beton Terhadap Kerapatan Beton Dengan Menggunakan Pulse Velocity Pada Alat UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)

Nama Mahasiswa : Enggie Ayu Herma Putri

NIM : 155060101111007

Program Studi : Teknik Sipil

Minat : Struktur

Tim Dosen Penguji :

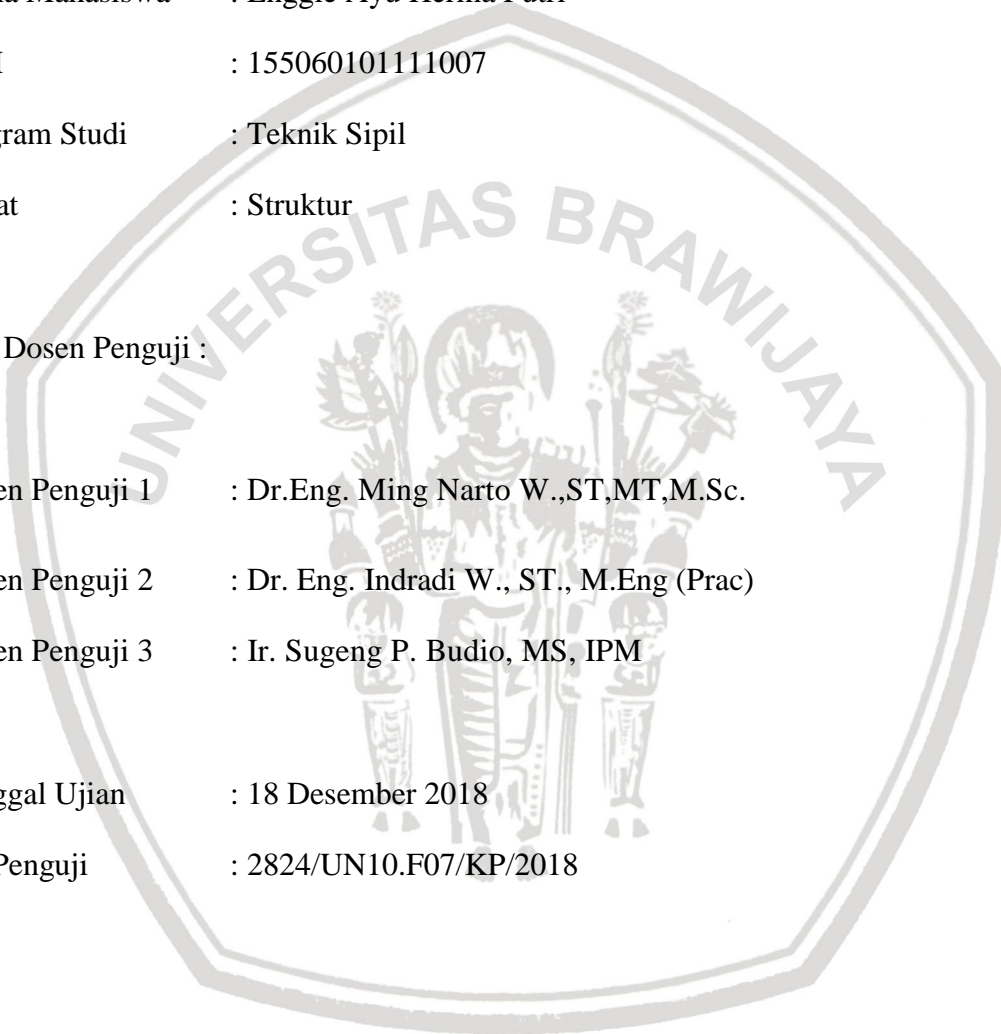
Dosen Penguji 1 : Dr.Eng. Ming Narto W.,ST,MT,M.Sc.

Dosen Penguji 2 : Dr. Eng. Indradi W., ST., M.Eng (Prac)

Dosen Penguji 3 : Ir. Sugeng P. Budio, MS, IPM

Tanggal Ujian : 18 Desember 2018

SK Penguji : 2824/UN10.F07/KP/2018



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah hasil pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu perguruan tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 20 Desember 2018

Mahasiswa,

Enggie Ayu Herma Putri

NIM. 155060101111007



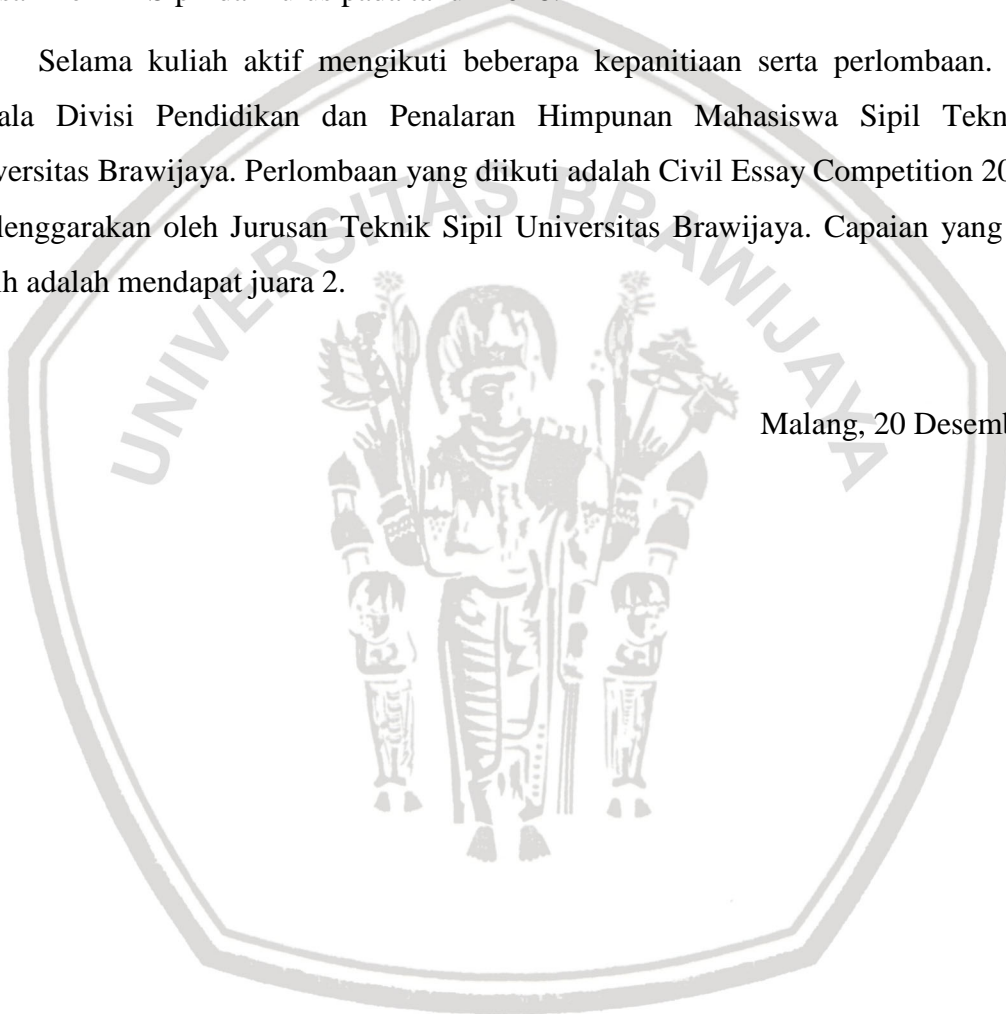
RIWAYAT HIDUP

Enggie Ayu Herma Putri, lahir di Ponorogo, 21 September 1996, anak kedua dari Bapak Heru Suharto dan Ibu Endah Sukmawati. Menjalani pendidikan sekolah dasar di SDN 1 Balong, lalu melanjutkan pendidikan menengah pertama di SMPN 1 Ponorogo, dan melanjutkan pendidikan menengah atas di SMAN 1 Ponorogo dan lulus pada tahun 2015. Kemudian dilanjutkan dengan mengambil pendidikan sarjana di Universitas Brawijaya Jurusan Teknik Sipil dan lulus pada tahun 2018.

Selama kuliah aktif mengikuti beberapa kepanitiaan serta perlombaan. Menjadi Kepala Divisi Pendidikan dan Penalaran Himpunan Mahasiswa Sipil Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Perlombaan yang diikuti adalah Civil Essay Competition 2017 yang diselenggarakan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Capaian yang berhasil diraih adalah mendapat juara 2.

Malang, 20 Desember 2018

Penulis





*Kupersembahkan untuk:
Bapak dan Ibu, serta Kakak Tercinta*

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kami panjatkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa yang telah melimpahkan segala anugerah-Nya dan rahmat-Nya sehingga saya dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“PENGARUH VARIASI AGREGAT KASAR PENYUSUN BETON TERHADAP KERAPATAN BETON DENGAN MENGGUNAKAN PULSE VELOCITY PADA ALAT UPV** dengan baik dan lancar. Skripsi ini merupakan persyaratan terakhir akademis yang telah ditetapkan untuk menyelesaikan tahap sarjana di **Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya**.

Tentunya kami dapat menyelesaikan skripsi ini dengan lancar karena bantuan dari banyak pihak. Karena itu, kami ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada :

1. Dr. Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST, MT selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
2. Dr. Eng. Eva Arifi, ST, MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya.
3. Dr. Eng Indradi W, ST, M.Eng (Prac) selaku Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing 1 Skripsi.
4. Ir. Sugeng P. Budio, MS, IPM selaku Dosen Pembimbing 2 Skripsi.
5. Dr. Eng Ming Narto W., ST, MT, M.Sc selaku Dosen Pembimbing.
6. Christin Remayanti N., ST, MT selaku Dosen Pembimbing.
7. Dr. Ir. Wisnumurti, MT selaku KKJF Struktur.
8. Segenap dosen dan Karyawan di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
9. Keluarga Saya yang Selalu Memberi Semangat dan Memberi Dukungan.
10. Teman skripsi Fatma Dora Indriani yang telah bekerja bersama dalam mengerjakan skripsi dari awal hingga akhir.
11. Teman saya Elliana, Erika, Hanita, Nurmadinah, Rifky Faisal, Kirei, Risma, Rima, Ilham Novriadi, Ainur Rofiq, Alfian yang selalu memberi bantuan dan semangat.
12. Teman-teman Asisten Laboratorium Mekanika Tanah Universitas Brawijaya.
13. Teman-teman Akademis Himpunan Mahasiswa Sipil Universitas Brawijaya.

14. Teman-teman di Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

15. Dan semua pihak yang telah membantu kelancaran penulisan skripsi ini, yang tidak dapat kami sebutkan satu per satu.

Kami menyadari bahwa skripsi ini jauh dari kesempurnaan, untuk itu segala kritik dan saran yang bersifat membangun sangat diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata, kami berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi pembaca.

Malang, 20 Desember 2018

Enggie Ayu Herma Putri



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	ix
DAFTAR LAMPIRAN	xi
RINGKASAN.....	xiii
SUMMARY	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah	2
1.3 Rumusan Masalah	2
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Tujuan.....	3
1.6 Manfaat.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 Agregat Kasar.....	5
2.1.1 Beton Porous	5
2.1.2 Agregat Kasar Daur Ulang (RCA)	6
2.1.3 Batu Apung	7
2.1.4 Beton Serat	8
2.1.4.1 Serat Baja.....	8
2.1.4.2 Serat <i>Polypropelene</i>	10
2.2 Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i>	10
2.3 Jenis-Jenis Gelombang Mekanik.....	11
2.4 Perambatan Gelombang	14

2.5	Metode Pengujian.....	15
2.6	Kuat Tekan Beton.....	18
2.7	Hubungan Kuat Tekan dengan Kerapatan Beton	19
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....		21
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.2	Peralatan dan Bahan Penelitian	21
3.2.1	Beton Porous	21
3.2.1.1	Alat Penelitian	21
3.2.1.2	Bahan Penelitian	22
3.2.2	Beton Agregat Kasar Daur Ulang (RCA)	22
3.2.2.1	Alat Penelitian	22
3.2.2.2	Bahan Penelitian	23
3.2.3	Beton Pumice Serat Kaleng.....	23
3.2.3.1	Alat Penelitian	23
3.2.3.2	Bahan Penelitian	24
3.2.4	Beton Fiber	24
3.2.4.1	Alat Penelitian	24
3.2.4.2	Bahan Penelitian	25
3.3	UPV Test	25
3.4	Uji Kuat Beton.....	25
3.5	Tahapan Penelitian	27
3.6	Rancangan Penelitian	28
3.7	Variabel Penelitian	29
3.8	Prosedur Penelitian.....	30
3.8.1	Pengujian Bahan Dasar	30
3.8.2	Pembuatan Benda Uji.....	30
3.8.3	Perawatan Benda Uji	30

3.8.4	Pengujian UPV	31
3.9	Metode Analisis.....	32
3.9.1	Pengumpulan Data	32
3.9.2	Pengolahan Data.....	32
3.9.3	Hipotesis.....	34
BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN		35
4.1	Pembuatan Benda Uji.....	35
4.1.1	Perencanaan Campuran (<i>Mix Design</i>) Benda Uji	35
4.2	Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Tekan.....	37
4.2.1	Beton Normal	37
4.2.2	Beton Fiber.....	38
4.2.3	Beton Pumice	40
4.2.4	Beton Porous	42
4.2.5	Beton Recycle	44
4.3	Hasil Pengujian <i>Ultrasonic Pulse Velocity</i> (UPV).....	46
4.3.1	Pengukuran dengan Moda PV (<i>Pulse Velocity</i>)	46
4.3.1.1	Beton Normal	46
4.3.1.2	Beton Fiber	47
4.3.1.3	Beton Pumice.....	49
4.3.1.4	Beton Porous	51
4.3.1.5	Beton Recycle.....	52
4.4	Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dengan Parameter Gelombang.....	54
4.5	Pengambilan Sampel Beton Acuan	58
4.6	Hubungan Parameter Gelombang dan Kuat Tekan Antara Berbagai Macam Agregat dengan Beton Acuan	59
BAB V PENUTUP		65
5.1	KESIMPULAN	65

5.2	SARAN	67
	DAFTAR PUSTAKA	69
	LAMPIRAN	71



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Syarat Gradasi Agregat Kasar (Batu Apung).....	7
Tabel 2.2	Sifat Fisik Batu Apung.....	8
Tabel 2.3	Jenis gelombang mekanik longitudinal berdasarkan frekuensi	12
Tabel 2.4	Kualifikasi kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang.....	18
Tabel 2.5	Hubungan kuat tekan beton dan UPV.....	20
Tabel 3.1	Variasi Penelitian Beton	28
Tabel 3.2	Hasil Perhitungan Kecepatan dan Kuat Tekan Beton.....	33
Tabel 4.1	Kebutuhan Bahan untuk Campuran Bahan Benda Uji	35
Tabel 4.2	Variasi Campuran Benda Uji	36
Tabel 4.3	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Normal.....	38
Tabel 4.4	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Fiber	39
Tabel 4.5	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Pumice.....	40
Tabel 4.6	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Porous.....	42
Tabel 4.7	Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Recycle.....	44
Tabel 4.8	Rekapitulasi Data Parameter <i>Pulse Velocity</i> Beton Normal	47
Tabel 4.9	Rekapitulasi Data Parameter <i>Pulse Velocity</i> Beton Fiber.....	48
Tabel 4.10	<i>Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity</i> Beton Pumice.....	49
Tabel 4.11	<i>Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity</i> Beton Porous.....	51
Tabel 4.12	<i>Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity</i> Beton Recycle	53
Tabel 4.13	<i>Rekapitulasi Data Kuat Tekan dan Kecepatan</i>	54

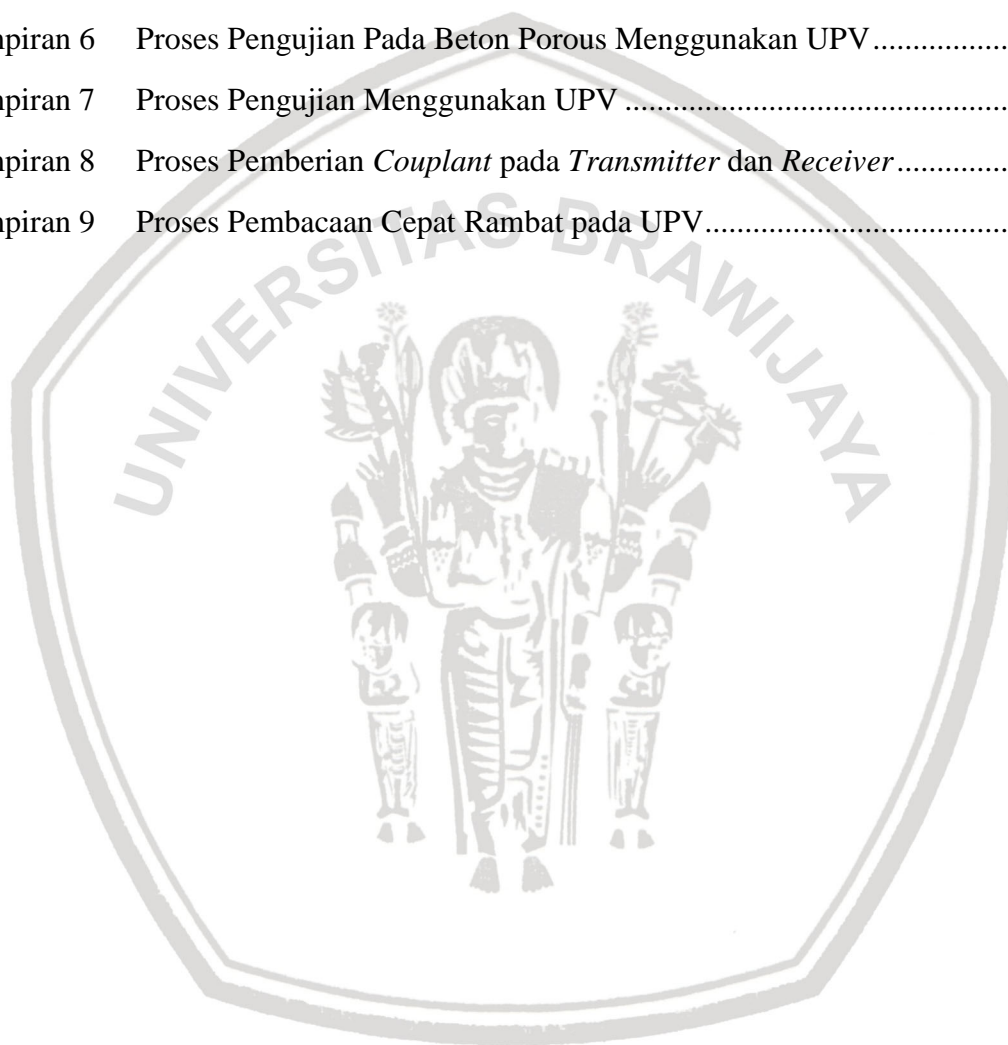
DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Batuan Daur Ulang	6
Gambar 2.2	Batuan Apung	7
Gambar 2.3	Berbagai Tipe Bentuk Serat Baja.....	9
Gambar 2.4	Pergerakan partikel pada gelombang P-waves dan S-waves ..	12
Gambar 2.5	Pergerakan partikel pada gelombang permukaan: Love-waves dan Rayleigh-waves.....	13
Gambar 2.6	Jenis-jenis gelombang pada alat pembaca gelombang.....	14
Gambar 2.7	Cara Pengukuran pada Tes UPV.....	15
Gambar 2.8	Diagram skematik dari instrument UPV.....	16
Gambar 2.9	Perubahan cepat rambat pada beton plain dan beton dengan admixture terhadap umur beton	19
Gambar 2.10	Bentuk gelombang dari beton acuan yang telah diketahui mutunya..	22
Gambar 3.1	Diagram alir tahapan penelitian	27
Gambar 3.2	Skema titik pengujian UPV pada benda uji silinder	31
Gambar 3.3	Proses kalibrasi awal alat uji UPV.....	32
Gambar 3.4	Tampilan data hasil pengujian UPV menggunakan aplikasi PL-Link.....	32
Gambar 3.5	Tampilan grafik kecepatan dan kuat tekan beton	33
Gambar 4.1	Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Normal.....	38
Gambar 4.2	Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Fiber	40
Gambar 4.3	Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Pumice.....	42
Gambar 4.4	Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Porous.....	44
Gambar 4.5	Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Recycle.....	45
Gambar 4.6	Kuat Tekan Sampel Beton Silinder dengan Uji Tekan.....	45
Gambar 4.7	Contoh Pengambilan Parameter Kecepatan.....	46
Gambar 4.8	Grafik Kecepatan Sampel Beton Normal	47
Gambar 4.9	Grafik Kecepatan Sampel Beton Fiber	48
Gambar 4.10	Grafik Kecepatan Sampel Beton Pumice.....	50
Gambar 4.11	Grafik Kecepatan Sampel Beton Porous.....	52

Gambar 4.12	Grafik Kecepatan Sampel Beton Recycle.....	53
Gambar 4.13	Kecepatan Sampel Beton Silinder dengan Alat UPV	54
Gambar 4.14	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Normal.....	56
Gambar 4.15	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Fiber.....	57
Gambar 4.16	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Pumice	57
Gambar 4.17	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Porous	58
Gambar 4.18	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton <i>Recycle</i>	58
Gambar 4.19	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Gabungan.....	59
Gambar 4.20	Contoh Pengambilan Parameter Kecepatan Beton Acuan.....	59
Gambar 4.21	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Fiber dan Beton Acuan	60
Gambar 4.22	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Pumice dan Beton Acuan	60
Gambar 4.23	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Pumice dan Beton Porous	61
Gambar 4.24	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Pumice dan Beton Recycle.....	61
Gambar 4.25	Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Gabungan.....	62
Gambar 4.26	Prosentase Sebaran Data di Setiap Kuadran	63

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1	Sampel Beton Normal.....	71
Lampiran 2	Variasi Jenis Beton Fiber	71
Lampiran 3	Variasi Jenis Beton Pumice	72
Lampiran 4	Variasi Jenis Beton Porous	72
Lampiran 5	Variasi Jenis Beton Recycle.....	73
Lampiran 6	Proses Pengujian Pada Beton Porous Menggunakan UPV	73
Lampiran 7	Proses Pengujian Menggunakan UPV	74
Lampiran 8	Proses Pemberian <i>Couplant</i> pada <i>Transmitter</i> dan <i>Receiver</i>	74
Lampiran 9	Proses Pembacaan Cepat Rambat pada UPV.....	75



RINGKASAN

Enggie Ayu Herma Putri, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Desember 2018, *Pengaruh Variasi Agregat Kasar Penyusun Beton Terhadap Kerapatan Beton dengan Menggunakan Pulse Velocity pada Alat UPV (Ultrasonic Pulse Velocity)*, Dosen Pembimbing: Indradi W. dan Sugeng P. Budio.

Beton merupakan material yang sering digunakan di bidang konstruksi. Beton diperoleh dari hasil pencampuran antara semen, air, agregat halus, agregat kasar, dengan perbandingan tertentu dan dapat ditambah dengan bahan tambahan campuran. Beton menjadi komponen utama struktural yang mampu menahan dan mendistribusikan seluruh beban-beban dalam suatu bangunan. Beton dipilih karena kuat tekannya yang sangat tinggi dibanding material lainnya. Beton sudah mengalami banyak perkembangan, yaitu perkembangan teknologi pada beton dengan ditemukannya kombinasi antara material penyusun beton. Dengan adanya berbagai macam kombinasi untuk campuran material beton, maka perlu dilakukan pengujian terhadap beton tersebut, salah satunya dilakukan pengujian dengan *non destructive test* atau pengujian tanpa merusak benda uji yaitu dengan alat UPV (*Ultrasonic Pulse Velocity*). Pada pengujian UPV didapatkan nilai cepat rambat. Untuk itu penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hubungan cepat rambat terhadap kuat tekan beton dengan variasi agregat kasar dan kualitas beton tersebut berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik.

Penelitian ini menggunakan alat PUNDIT PL-200 untuk dilakukan proses analisis kerapatan beton berdasarkan parameter yang dihasilkan dari alat UPV tersebut. Parameter yang diambil pada pengujian ini yaitu cepat rambat gelombang. Cepat rambat adalah kecepatan yang dibutuhkan gelombang untuk merambat dari transducer pengirim ke transducer penerima. Dari alat tersebut akan mendapatkan nilai kecepatan. Penelitian ini menggunakan benda uji silinder dengan diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Benda uji dibedakan menjadi 4 variasi komposisi agregat kasar campuran beton (*mix design*) yaitu beton variasi fiber dengan mutu beton rencana 17 Mpa, beton variasi pumice dengan mutu beton rencana 17 Mpa, beton variasi porous dengan mutu beton rencana 14 Mpa, dan beton variasi recycle (*Recycled Coarse Aggregate*) dengan mutu beton rencana 20 Mpa.

Dari pengujian UPV pada penelitian ini menunjukkan bahwa masing masing variasi agregat mempunyai hubungan kuat tekan dan kecepatan yang berbeda-beda. Hal ini ditunjukkan dengan nilai koefisien determinasi R^2 yang diperoleh. Pada beton variasi fiber nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,5162. Beton variasi pumice nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,0005. Beton variasi porous nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,5243. Beton variasi recycle nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,0318. Hal ini dikarenakan perambatan gelombang akan memiliki kecepatan yang lebih cepat pada beton yang memiliki kerapatan tinggi yang kemungkinan besar kuat tekannya juga tinggi. Sedangkan untuk beberapa variasi beton belum memberikan pola sebaran data yang konsisten dalam hubungannya dengan kuat tekan. Faktor penyebabnya adalah ketidakseragaman komposisi dan susunan agregat yang menimbulkan pembacaan kecepatan yang berbeda-beda meskipun dalam satu sampel yang sama.

Kata Kunci: Cepat rambat, Beton, Beton Fiber, Beton Porous, Beton Pumice, Kuat Tekan, *Recycled Coarse Aggregate*, *Ultrasonic Pulse Velocity*.

SUMMARY

Enggie Ayu Herma Putri, Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Universitas Brawijaya, December 2018, *The Effect of Coarse Aggregate Variations to the Concrete Density by Measuring the Pulse Velocity on the Ultrasonic Pulse Velocity Testing*, Academic Supervisor: Indradi W. and Sugeng P Budio.

Concrete is a material that is often used in the construction sector. Concrete is obtained from the mixture of cement, water, fine aggregate, coarse aggregate, with certain comparisons and can be added with a mixture of additional ingredients. Concrete is the main structural component that is able to hold and distribute all loads in a building. Concrete is chosen because of its very high compressive strength compared to other materials. Concrete has experienced many developments, namely technological developments in concrete with the discovery of a combination materials of concrete constituent. With the presence of various combinations for the mixture of concrete materials, it is necessary to acknowledge the testing of the concrete, one of which is tested with a non-destructive test or test without damaging the test object, namely with an UPV (Ultrasonic Pulse Velocity). In UPV testing, the propagation value is obtained. For this reason the aim of this study is to determine the relationship between the rate of propagation to the compressive strength of concrete with coarse aggregate variation and the quality of the concrete based on the characteristics of ultrasonic waves.

This study used the PL - PUNDIT 200 to analyze the concrete density based on the parameters produced from the UPV tool. The parameters taken in this test are propagation wave. Fast propagate is the speed that the wave requires to propagate from the sending transducer to the receiver transducer. From the tool will get the speed value. This study uses a cylindrical specimen with a diameter of 15 cm and a height of 30 cm. The specimens are divided into 4 variations in the composition of coarse aggregate concrete (mix design), namely fiber variation concrete with the quality of concrete plan 17 Mpa, concrete variation pumice with the quality of concrete plan 17 Mpa, concrete porous variation with concrete quality plan 14 Mpa, and concrete variation recycle (Recycled Coarse Aggregate) with a concrete quality plan of 20 MPa.

From UPV testing in this study showed that each of the aggregate variations had a different correlation between compressive strength and speed. This is indicated by the coefficient of determination R^2 which is obtained. In varisi fiber concrete determination coefficient value R^2 of 0.5162. Pumice variation concrete determination coefficient value R^2 is 0.0005. Porous concrete variation coefficient of determination value R^2 of 0.5243. Concrete recycle variation coefficient of determination value R^2 of 0.0318. This is because the wave propagation will have a faster speed in concrete that has a high density which is likely to have a high compressive strength. Whereas for several concrete variations it has not provided a consistent data distribution pattern in relation to compressive strength. The causative factor is the lack of uniform composition and aggregate arrangement which gives rise to different speed readings even in the same sample.

Keywords: Fast propagation, Concrete, Concrete Fiber, Porous Concrete, Concrete Pumice, Compressive Strength, Recycled Coarse Aggregate, Ultrasonic Pulse Velocity.

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kemajuan teknologi dan pembangunan di Indonesia semakin meningkat, terutama dalam bidang konstruksi. Perkembangan konstruksi semakin pesat terutama di bidang material, salah satunya penggunaan beton untuk bahan konstruksi. Beton merupakan material yang sering digunakan di bidang konstruksi. Beton diperoleh dari hasil pencampuran antara semen, air, agregat halus, agregat kasar, dengan perbandingan tertentu dan dapat ditambah dengan bahan tambahan campuran. Beton menjadi komponen utama struktural yang mampu menahan dan mendistribusikan seluruh beban-beban dalam suatu bangunan. Beton dipilih karena kuat tekannya yang sangat tinggi dibanding material lainnya. Pada era modern ini beton sudah mengalami banyak perkembangan, yaitu perkembangan teknologi pada beton dengan ditemukannya kombinasi antara material penyusun beton. Dengan adanya berbagai macam kombinasi untuk campuran material beton, maka dilapangan kualitas beton harus selalu diperhatikan dengan pengawasan agar memenuhi syarat perencanaan. Dalam proses penguatan perlu dilakukan pengujian untuk mengontrol kualitas dari beton tersebut agar kualitas beton sesuai syarat perencanaan.

Kekuatan beton dapat diuji dalam dua cara yaitu pengujian laboratorium dan pengujian lapangan. Pengujian yang umum dilakukan ialah pengujian laboratorium dengan sampel basah, yaitu dengan cara mengambil beberapa sampel beton segar sebelum pengecoran untuk diuji di laboratorium. Beton tersebut disimpan hingga umur beton 28 hari kemudian dilakukan pengujian. Pengujian ini menghasilkan hasil yang akurat, sebab data kekuatan beton diperoleh dari uji sampel secara langsung. Namun dalam pengujian ini memiliki kekurangan yaitu hasil pengujian kurang mewakili kualitas beton aktual pada struktur yang telah jadi. Pada struktur yang telah jadi, kualitas beton mengalami perbedaan. Perbedaan ini disebabkan karena proses pengerjaan beton serta kondisi lingkungan di lapangan misalnya kelembaban, temperatur, dan faktor lainnya. Faktor-faktor tersebut tidak dapat diketahui hanya melalui uji laboratorium saja. Oleh karena itu diperlukan pengujian lapangan dengan sampel kering. Salah satunya dengan cara non destruktif merupakan tes kekuatan beton tanpa merusak benda uji. Pelaksanaannya dilakukan di tempat kerja (*insitu*) pada struktur bangunan di lapangan. Hasil yang akurat dapat diperoleh melalui pengambilan

sampel inti dari beton struktural yang notabene akan merusak struktur bangunan (*destructive test*) yang ada dan memerlukan tindak lanjut berupa perbaikan.

Metode yang umum dipakai untuk pengujian beton *in situ* tanpa merusak struktur atau yang disebut *non-destructive test (NDT)* salah satunya adalah menggunakan kecepatan pulse ultrasonik atau *ultrasonic pulse velocity (UPV)*. Alat yang digunakan dalam pengujian UPV disebut PUNDIT (*Portable Ultrasonic Nondestructive Digital Indicating Tester*). Alat tersebut mampu mengetahui cepat rambat gelombang ultrasonik. Dari data cepat rambat tersebut dapat ditunjukkan bagaimana kerapatan, homogenitas, serta ada tidaknya rongga di dalam beton. Dari penelitian-penelitian sebelumnya belum dibahas secara jelas mengenai pengaruh berbagai macam komposisi material beton dilihat dari cepat rambat dan interpretasinya terhadap kerapatan yang berujung pada kualitas beton.

1.2 Identifikasi Masalah

Salah satu pengujian kualitas beton yang tak merusak (*non-destructive test*) adalah *UPV Test*. Dari pengujian tersebut didapatkan data berupa kecepatan yang berasal dari pancaran gelombang yang merambat melalui beton. Dari kecepatan tersebut perlu diinterpretasikan untuk menentukan kualitas dari beton tersebut. Sehingga perlu dilakukan penelitian mengenai kecepatan gelombang dari alat uji UPV untuk dapat mengetahui kualitas beton secara praktis terutama ketika di lapangan.

1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi fiber dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*)?
2. Bagaimana hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi pumice dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*)?
3. Bagaimana hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi porous dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*)?
4. Bagaimana hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan pada beton recycle dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*)?

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini dikhususkan untuk beton tak bertulang, dengan menggunakan benda uji silinder.
2. Pada penelitian ini parameter kerapatan yang dianalisis adalah berdasarkan pengujian UPV
3. Pengujian yang dilakukan menggunakan berbagai macam variasi agregat, yaitu variasi porous, variasi agregat kasar daur ulang (RCA), variasi agregat kasar batu apung (Pumice) dan variasi fiber.
4. Mutu beton yang digunakan, variasi porous sebesar 14 Mpa, variasi agregat kasar daur ulang (RCA) sebesar 20 Mpa, variasi agregat kasar batu apung (Pumice) sebesar 17 Mpa, dan variasi fiber sebesar 17 Mpa.

1.5 Tujuan

1. Untuk mengetahui hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi fiber dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*).
2. Untuk mengetahui hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi pumice dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*).
3. Untuk mengetahui hubungan *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi porous dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*).
4. Untuk mengetahui *Pulse Velocity* yang menggambarkan kerapatan beton pada beton variasi recycle dengan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombang ultrasonik pada alat UPV (*Ultrasoniv Pulse Velocity*).

1.6 Manfaat

Manfaat yang diharapkan dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Bagi penulis:
 - Dapat mengetahui kerapatan dan mutu dari beton dengan kecepatan pada pengujian UPV
 - Dapat mengetahui pengaruh *Pulse Velocity* terhadap beton dengan campuran agregat kasar yang berbeda.

2. Bagi pembaca:

- Dapat menjadi acuan untuk menentukan kualitas beton berdasarkan *Pulse Velocity* Gelombang.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Agregat Kasar

Berdasarkan ASTM C-125 agregat kasar adalah seluruh agregat yang masih tertahan pada saringan nomor 4 standar ASTM yang berukuran 4,75 mm. Agregat kasar adalah kerikil sebagai hasil desintegrasi alami dari batu atau berupa batu pecah yang diperoleh dari industri pemecah batu dan mempunyai ukuran butir antara 5 mm – 40 mm. Syarat-syarat agregat kasar agar dapat digunakan untuk campuran beton adalah sebagai berikut:

1. Ukuran diameter agregat kasar yang baik adalah 5 mm sampai 40 mm.
2. Agregat kasar harus terdiri dari butiran-butiran yang keras dan tidak berpori
3. Agregat kasar tidak boleh mengandung lumpur lebih dari 1% terhadap berat kering.
4. Agregat kasar harus terdiri dari beraneka ragam besarnya.

2.1.1 Beton Porous

Beton porous biasa disebut juga beton non-pasir dan biasa dikenal pula sebagai pervious concrete adalah campuran antara air, semen, dan agregat kasar yang nantinya akan membentuk suatu material tembus air (Neville dan Brooks, 2010). Gradasi penyeragaman pada agregat kasar dapat disesuaikan. Pada dasarnya, beton porous tersusun atas agregat kasar yang diselimuti dengan lapisan pasta semen tipis sekitar 1,3 mm (Neville dan Brooks, 2010). Dengan mix design terdiri dari: semen (270-415 kg), agregat kasar (1190-1480 kg), faktor air semen (0,27-0,34), perbandingan berat pasir dan kerikil sebesar 0 hingga 1 : 1 serta terdapat penambahan chemical admixtures (ACI 522R-10).

Beton porous/beton permeable/ beton yang dapat meresapkan air, pada dasarnya beton tersebut dapat menjadi solusi, namun dibutuhkan edukasi yang lebih tentang beton porous ini, untuk mendorong konstruksi yang ramah lingkungan serta berkelanjutan dibutuhkan semacam regulasi oleh pemerintah, dimana untuk konstruksi prasarana digunakan pervious concrete, sehingga dapat meresapkan air kedalam tanah, dengan kemampuan peresapan air antara 100L hingga 700L per menit per meter persegi. Dengan peresapan air sedemikian rupa, tentunya menjadi harapan untuk pembangunan perkotaan yang ramah lingkungan. Dengan demikian, bencana dapat berkurang. Previous concrete ini dapat dibuat dengan cara yang mudah, hanya dengan menggunakan material bahan bangunan yang biasa kita gunakan dalam konstruksi, pada pembuatan previous concrete

lebih banyak digunakan agregat kasar sesuai ASM C 33 No. 89 (9,5 mm) bahkan sampai agregat dengan ukuran 25 mm. sedang agregat halus tidak digunakan, apabila digunakan pun hanya dalam jumlah yang sedikit. Biasanya, Previous Concrete juga disebut dengan beton daur ulang.

2.1.2 Agregat Kasar Daur Ulang (RCA)

Beton daur ulang dapat menjawab banyaknya permasalahan limbah industri konstruksi dan permasalahan akan melestarikan sumber daya alam. Beton agregat kasar daur ulang atau *Recycled Concrete Aggregates (RCA)* adalah agregat yang terbentuk dari proses pemecahan, pengukuran, pencucian, dan pemilihan dari beton keras yang sudah ada. Limbah beton yang tidak terpakai dihancurkan dengan mesin penghancur batu lalu diayak agar mendapatkan butiran-butiran agregat kasar yang diinginkan.



Gambar 2.1 Batuan daur ulang

Perkerasan dengan menggunakan beton banyak digunakan untuk pekerjaan konstruksi baik dari konstruksi gedung, jalan, maupun jembatan sehingga penggunaan RCA akan sangat bermanfaat. Namun RCA tidak diijinkan untuk digunakan pada beton structural tapi dapat diaplikasikan pada beton non structural seperti batas jalan, perkerasan jalan, dan lain-lainya.

Perbandingan sifat beton dengan menggunakan RCA dengan beton yang menggunakan NCA adalah:

- Kuat tekan menurun sebesar 10% - 30%.

- Kuat tarik lebih rendah dan tidak lebih dari 10%.
- Modulus elastisitas menurun sebesar 10% - 40% tergantung dari sumber agregat kasarnya.
- Susut lebih besar 20% - 55% sedangkan *creep* lebih kecil hingga 10% (EL-Reedy, 2009).

2.1.3 Batu Apung

Batu apung adalah salah satu batuan sediman dari batuan vulkanis yang bobotnya ringan karena memiliki banyak pori. Batu apung biasanya memiliki warna terang atau keputih-putihan. Karena bobotnya yang ringan, maka jika digunakan sebagai agregat kasar pada pembuatan beton akan diperoleh beton yang ringan (Hidayat, 2012).



Gambar 2.2 Batuan Apung

Distribusi dari batu apung menurut SNI 03-2834-200, yaitu gradasi yang memiliki diameter maksimum 12,5 mm.

Tabel 2.1

Syarat Gradasi Agregat Kasar (Batu Apung)

Lubang ayakan (mm)	persen berat tembus kumulati (%)		
	40 mm	20 mm	12,5 mm
40	95-100	100	100
20	30-70	95-100	100

Lubang ayakan (mm)	persen berat tembus kumulati (%)		
	40 mm	20 mm	12,5 mm
12,5	-	-	90-100
10	10-35	25-55	40-85
4,8	0-5	0-10	0-10

Adapun beberapa sifat fisik dari batu apung dijelaskan pada table dibawah ini:

Tabel 2.2

Sifat Fisik Batu Apung

Unsur	Kapasitas
Bobot isi ruang	480-960 kg/cm ³
Peresapan air	16,67%
Berat Jenis	0,8 gr/cm ³
Hantaran Suara	Rendah
Ratio kuat tekan terhadap beban	Tinggi
Konduktivitas terhadap api	Rendah
Ketahanan terhadap api	s/d 6 jam

Pelapisan agregat yaitu merupakan metode yang digunakan untuk memenuhi tujuan tertentu. Pelapisan ini biasanya menggunakan cat, tanah liat dan debu atau lumpur. Terdapat beberapa teknik pada pelapisan seperti dengan melapisi semua permukaan agregat atau melapisi sebagian agregat tergantung dengan tujuannya.

2.1.4 Beton Serat

Beton serat didefinisikan sebagai beton yang terbuat dari campuran semen, agregat halus, agregat kasar dan sejumlah kecil serat/*fiber* (ACI Committee 544, 1982). Bahan-bahan serat yang bisa digunakan dalam memperbaiki sifat beton pada beton serat yaitu baja, plastik, kaca, karbon serta serat dari bahan alami seperti ijuk, rami maupun serat dari tumbuhan lain (ACI, 1982).

Penambahan serat ke dalam beton akan meningkatkan kuat tarik beton yang umumnya rendah. Pertambahan kuat tarik akan memperbaiki kinerja komposit beton serat dengan kualitas yang lebih bagus dibandingkan dengan beton konvensional.

2.1.4.1 Serat Baja

Serat baja memiliki kelebihan yaitu kekuatan dan modulus elastisitasnya yang tinggi, tetapi serat ini juga memiliki kelemahan yaitu sifat korosif. Ada beberapa jenis *fiber* baja yang dapat digunakan (Soroushian dan Bayasi, 1991):

1. Bentuk serat baja (*steel fiber shapes*)
 - a. Lurus
 - b. Berkait
 - c. Bergekombang
 - d. Double duo form
 - e. Ordinary duo form
 - f. Bundle
 - g. Kedua ujung ditekuk
 - h. Tidak teratur
 - i. Bergerigi
2. Penampang serat baja (*steel fiber cross section*)
 - a. Lingkaran atau kawat
 - b. Persegi atau lembaran
 - c. Tidak teratur
3. Serat dilekatkan bersama dalam satu ikatan.



Hooked-end



Twisted



Straight

Gambar 2.3 Berbagai Tipe Bentuk Serat Baja

(Sumber: Soroushian dan Bayasi, 1991)

Beberapa riset tentang beton serat dari abaja telah banyak dipublikasikan. Dalam ACI 544.1R (1982) disebutkan bahwa penggunaan serat baja 3% terhadap volume beton dapat meningkatkan kuat tarik sebanyak 2,5 kali dan untuk kandungan serat 2% dapat meningkatkan kuat tarik sebanyak 2 kali.

Penelitian Balaguru, Narahari dan Paterl (1992) dengan variable yang ditinjau adalah 3 buah tipe serat yaitu dibengkokan, bergelombang serta dengan ujung dibentuk. 3 jenis panjang serat yaitu 20, 50 dan 60 mm dan 4 jenis jumlah kandungan serat yaitu 30, 60, 90 dan 120 kg/m³. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kandungan serat 30 sampai 60 kg/m³ sangat meningkatkan daktilitas pada beton normal. Serat dengan ujung dibengkokan akan memberikan hasil yang lebih baik disbanding 2 tipe lainnya. Untuk panjang serat 30 sampai 60 mm tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada kekuatan serat dengan ujung yang dibengkokan.

Rossi (1994) meneliti dengan menggunakan 2 tipe serat yaitu dengan penampang ujung di bengkokan dan serat berbentuk pita. Pada setiap jenis serat divariasikan dengan 3 jenis panjang (15, 30 dan 60 mm) dan berbagai presentase serat yang ditambahkan, memberikan kesimpulan jumlah minimum serat yang diperlukan sekitar 1% dari volume beton.

Iwan Rustendi (2013) meneliti beberapa variasi volume fraksi yaitu 0%, 0,15%, 0,3%, 0,45%, 0,75% dan 0,90% hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan potongan kaleng bekas kemasan mengakibatkan menurunnya sifat kemudahan pengerjaan. Peningkatan kuat tekan tertinggi terjadi pada beton dengan volume fraksi 0,6% dan peningkatan kuat tarik belah tertinggi juga terjadi pada beton dengan volume fraksi 0,6%. Sedangkan pada penelitian Ravinder (2016) dengan mencampur beton dengan serat kaleng yang dipilin 180 derajat dengan fraksi 0%, 0,1%, 1% dan 1,5%. dengan lebar *fiber* 0,2cm dan panjangnya 2 cm membuktikan bahwa *fiber* tersebut tidak menyebabkan kenaikan pada kuat tekan maupun kuat tarik belah beton.

2.1.4.2 Serat *Polypropelene*

Serat *polypropelene* merupakan serat plastik. Serat plastik memiliki sifat ringan, tahan lama, tahan panas, tidak reaktif dengan semen dan tidak menyerap air. Selain itu modulus elastisitas yang dihasilkan antara 5000-17200 MPa dan kuat tarik 200-3030 MPa (Izzudin dkk, 2014).

2.2 Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Pengujian UPV adalah cara untuk memperkirakan kekerasan beton yang didasarkan pada hubungan cepat rambat gelombang melalui media beton dengan kekuatan tekan beton itu (*International Atomic Energy Agency*, Vienna, 2002). Pengujian dilakukan dengan mengukur kecepatan perambatan gelombang elektronik longitudinal yang melalui media beton.

Metode kecepatan pulsa ultrasonik atau UPV telah berhasil digunakan untuk mengevaluasi kualitas dari beton selama lebih dari 60 tahun. Metode ini dapat digunakan untuk mendeteksi retak internal dan cacat lainnya termasuk perubahan dari beton seperti penurunan kualitas beton akibat lingkungan kimia yang agresif atau pembekuan dan pencairan (V.M Malhotra & N.J Carino, 2004).

Dengan menggunakan metode kecepatan pulsa juga dapat memperkirakan kekuatan dari benda uji beton maupun beton di lapangan. Metode ini termasuk *non-destructive test*, karena menggunakan gelombang mekanik yang tidak menimbulkan kerusakan pada elemen beton yang diuji.

Kecepatan gelombang ultrasonik dipengaruhi oleh kekakuan elastis dan kekuatan beton; pada beton dengan pemadatan yang kurang baik, atau mengalami kerusakan butiran material, gelombang UPV akan mengalami penurunan kecepatan. Perubahan kekuatan beton pada tes UPV ditunjukkan dengan perbedaan kecepatan gelombangnya; jika kecepatan turun, adalah tanda bahwa beton mengalami penurunan kekuatan, dan sebaliknya, jika kecepatan naik, adalah tanda bahwa kekuatan beton meningkat (Hamidian, 2012).

2.3 Jenis-Jenis Gelombang Mekanik

Gelombang mekanik adalah gelombang yang dalam perambatannya memerlukan medium atau penghantar untuk dapat merambat. Medium gelombang mekanik dapat berupa zat padat, zat cair, atau gas. Berdasarkan arah getarnya, gelombang mekanik dibagi menjadi dua yaitu gelombang longitudinal dan gelombang transversal. Gelombang longitudinal adalah gelombang yang arah getarnya searah (paralel) dengan arah rambatannya, sedangkan pada gelombang transversal adalah gelombang yang arah getar dari tiap titik partikel dalam medium, tegak lurus dengan arah perambatan gelombang.. Menurut frekuensinya, gelombang mekanik longitudinal dibedakan menjadi gelombang infrasonik, gelombang audiosonik, dan gelombang ultrasonik seperti pada tabel 2.3.

Tabel 2.3

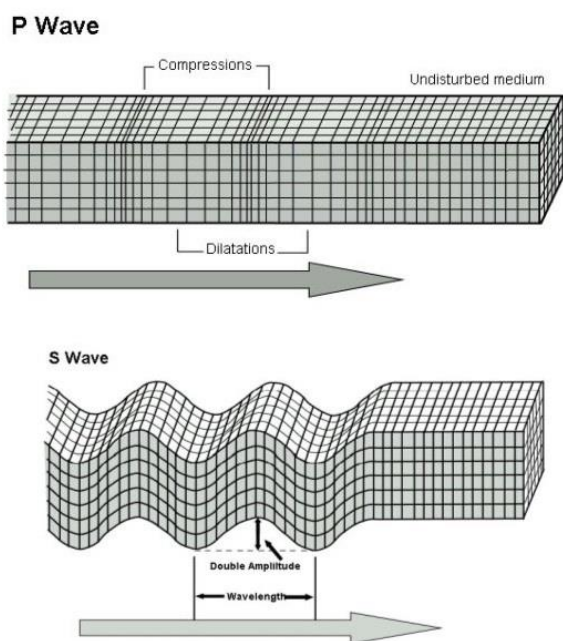
Jenis gelombang mekanik longitudinal berdasarkan frekuensi

Jenis Gelombang	Frekuensi	Keterangan
Infrasonik	$< 20 \text{ Hz}$	Didengar jangkrik dan anjing
Audiosonik	$20 - 20.000 \text{ Hz}$	Didengar manusia
Ultrasonik	$> 20.000 \text{ Hz}$	Didengar kelelawar

Gelombang mekanik menyalurkan energi pada partikel dalam medium rambatnya, sehingga dalam perambatannya terjadi pergerakan dan interaksi antar partikel. Tiga jenis gelombang mekanis akan timbul ketika suatu permukaan dari media padat elastis yang besar diberikan beban dinamis maupun getaran, yaitu:

1. Gelombang kompresi atau longitudinal (*compressional waves* atau *P-waves*)

P-waves juga disebut gelombang kompresi karena memberikan tegangan tekan dan tarik (sejajar arah rambatnya) pada medium rambatnya. Pada gelombang ini partikel beresilasi maju dan mundur dari titik ekuilibriumnya. Gelombang ini mampu merambat melalui segala jenis medium baik padat, cair, maupun gas. *P-waves* memiliki kecepatan rambat yang paling cepat, tetapi amplitudonya paling kecil di antara gelombang-gelombang lainnya.



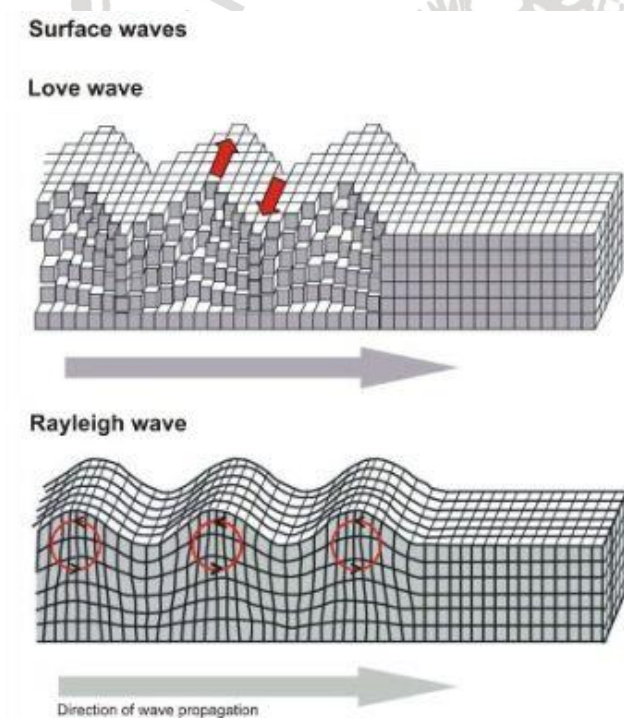
Gambar 2.4 Pergerakan partikel pada gelombang *P-waves* dan *S-waves*

2. Gelombang geser atau transversal (*shear waves* atau *S-waves*)

S-waves menimbulkan tegangan geser pada partikel dalam medium rambatnya. Pada gelombang ini partikelnya berosilasi secara tegak lurus dengan arah rambatan (transversal). Karena merambat melalui medium ruang, gelombang ini juga dibagi menjadi gerak horizontal (SH) dan gerak vertikal (SV).

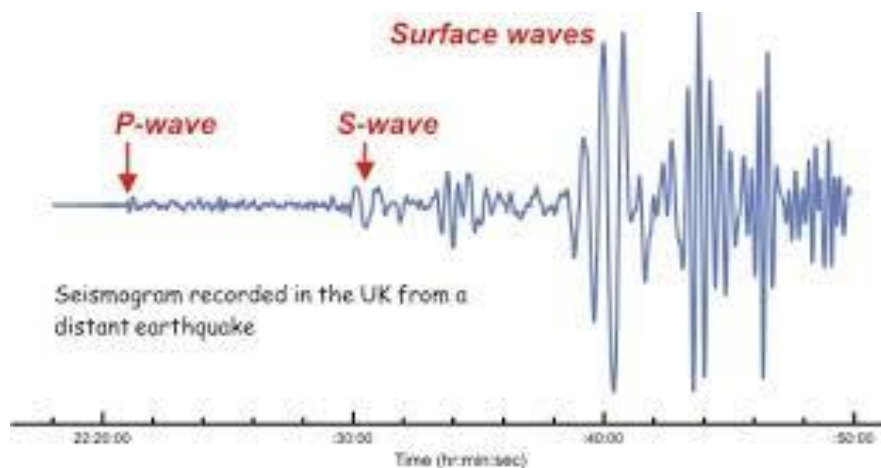
3. Gelombang permukaan (*surface waves*)

Gelombang permukaan merupakan gelombang yang merambat melalui permukaan dan semakin mengecil apabila semakin menjauhi permukaan. Gelombang permukaan merambat lebih lambat dan frekuensinya lebih rendah dari gelombang badan (*P-waves* dan *S-waves*), tetapi memiliki amplitudo yang lebih besar. Gelombang permukaan dibagi menjadi 2 yaitu *Love waves* dan *Rayleigh waves*. *Love waves* merupakan gelombang yang arah gerak partikelnya tegak lurus arah rambatnya (transversal), tetapi terjadi di permukaan. Sedangkan *Rayleigh waves* memiliki gerakan partikel yang *eliptik retrograde*, yaitu bergerak menggulung medium yang dilalui dan terlihat seperti gerakan gelombang air di laut.



Gambar 2.5 Pergerakan partikel pada gelombang permukaan: *Love-waves* dan *Rayleigh-waves*

2.4 Perambatan Gelombang



Gambar 2.6 Jenis-jenis gelombang pada alat pembaca gelombang.

Masing-masing jenis gelombang memiliki karakteristik cepat rambat yang berbeda-beda. Pada benda padat, *P-waves* merambat paling cepat sedangkan gelombang permukaan yang paling lambat, seperti pada gambar 2.5. Pada beton, menurut ASTM kecepatan rambat *S-waves* dan permukaan berturut-turut adalah 60 dan 55% dari kecepatan rambat *P-waves*. Kecepatan rambat gelombang bergantung pada sifat elastis dan kerapatan dari mediumnya. Untuk medium padat elastis yang homogen, kecepatan rambat *P-waves* adalah:

$$V = \sqrt{\frac{KE}{\rho}} \dots \dots \dots (2-1)$$

Dengan:

V = kecepatan rambat,

$$K = \frac{1 - \mu}{(1 + \mu)(1 - 2\mu)}$$

E = modulus elastis dinamis

ρ = kerapatan

μ = rasio Poisson dinamis

Rentang variasi dari nilai K sangat kecil, yaitu antara 1,06-1,20. Tetapi, variasi nilai E dan ρ berpengaruh signifikan terhadap V. Umumnya kecepatan rambat (V) pada beton yaitu antara 3000 hingga 5000 m/s.

Ketika rambatan gelombang menemui bagian yang memiliki sifat material yang berbeda, sebagian energi dari gelombang tersebut akan tersebar dari lintasan awal

gelombang. Misalnya dengan adanya rongga, retak, maupun partikel agregat dalam beton akan menyebarkan sebagian energi gelombang kompresi dari lintasan awal gelombang tersebut. Tingkat penyebaran akan meningkat ketika panjang gelombang yang merambat besarnya lebih kecil atau sama dengan ukuran bagian penyebarannya, yang menimbulkan terjadinya gelombang tersebut mengalami redaman lebih cepat. Pada beton, batas maksimal dari frekuensi yang digunakan adalah 500 kHz sebagaimana terkait dengan panjang gelombang sekitar 10 mm, yang berada dalam rentang ukuran agregat kasar.

2.5 Metode Pengujian

Tes UPV dapat dilakukan dalam tiga cara yaitu secara langsung, semi langsung, dan tidak langsung.



Gambar 2.7 Cara Pengukuran pada Tes UPV

(Sumber: *International Atomic Energy Agency*, 2002: 101 – 102)

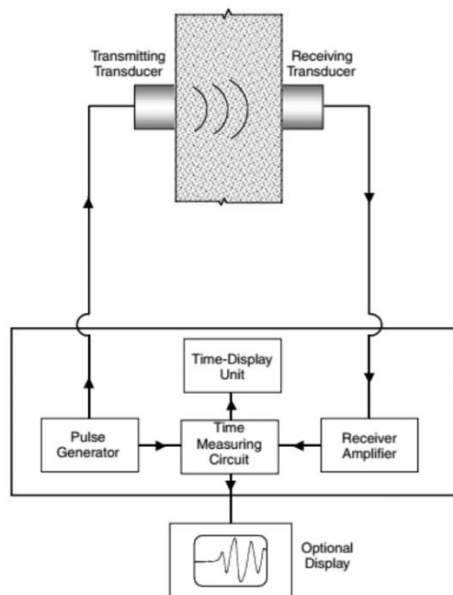
Pada saat pelaksanaan di lapangan, terdapat beberapa metode pengukuran dengan menggunakan UPV. Adapun metode – metode tersebut antara lain:

- Direct transmission (langsung), yaitu receiver dan transmitter diletakkan saling berhadapan, sehingga lintasan gelombang akan menjadi tegak lurus dengan permukaan transducer. Panjang lintasan merupakan hasil pengukuran antar transducer yaitu jarak antara 2 sisi beton yang akan di uji. Dengan metode ini, menghasilkan transmisi energi gelombang paling besar dibandingkan metode lainnya. Itulah sebabnya metode ini menghasilkan hasil yang paling baik dan memuaskan.
- Semi-direct transmission (semi langsung), yaitu transducer dipasang pada kedua sisi yang berbeda dan tidak saling berhadapan. Untuk pengukuran Panjang

lintasan didapatkan dengan mengukur jarak miring kedua transduser. Dengan jarak antara transmitter dan receiver tidak terlalu jauh, maka metode ini cukup mendapatkan hasil yang memuaskan.

- c. Indirect atau surface transmission (tidak langsung), yaitu pemasangan receiver dan transmitter pada sisi beton yang sama. Penggunaan metode ini yaitu apabila hanya ada salah satu sisi beton yang dapat diakses. Apabila menggunakan metode ini, harus menentukan jarak terlebih dahulu. Hasil statistik yang diperoleh dengan menggunakan metode ini hampir sama dengan hasil pengujian dengan metode direct.

Cara kerja alat UPV, dengan memberikan getaran gelombang longitudinal melewati transduser elektro akustik, yang merambat melalui cairan pasta yang disebut couplant. Sebelum pengujian dimulai pada permukaan beton diolesi cairan kental (couplant). Saat gelombang merambat melalui media yang berbeda, yaitu permukaan beton dan couplant maka akan terjadi pantulan gelombang yang merambat dalam bentuk gelombang longitudinal dan geser. Gelombang longitudinal merambat sejajar lintasan dan gelombang geser merambat tegak lurus lintasan.



Gambar 2.8 Diagram skematik dari instrument UPV

Sumber: V.M Malhotra & N.J Carino (2004)

Pertama kali yang mencapai transduser penerima adalah gelombang longitudinal. Oleh transduser, gelombang ini diubah menjadi sinyal gelombang elektronik yang dapat dideteksi oleh transduser penerima, sehingga waktu tempuh gelombang dapat diukur.

Waktu tempuh T yang dibutuhkan untuk merambatkan gelombang pada lintasan beton sepanjang L dapat diketahui, sehingga kecepatan gelombang dapat dicari dengan Persamaan (2.1) (Lawson, 2011)

$$v = L / T \dots\dots\dots (2-2)$$

N : Kecepatan gelombang longitudinal (km/detik atau m/detik)

L : Panjang lintasan beton yang dilewati (km, m)

T : Waktu tempuh gelombang longitudinal ultrasonik pada lintasan L (detik)

Hasil perhitungan tersebut juga dapat menginterpretasikan kualitas dari beton, antara lain:

- a. Mendeteksi rongga
- b. Homogenitas beton
- c. Menentukan modulus elastis dinamis dan rasio poisson dinamis
- d. Mendeteksi keretakan
- e. Memperkirakan kuat tekan beton
- f. Memperkirakan modulus elastisitas beton

Tabel 2.4

Kualifikasi kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang

Cepat Rambat gelombang longitudinal		Kualitas
km/detik	ft/detik	
> 4,5	> 15	Sangat Baik
3,5 - 4,5	12 - 15	Baik
3,0 - 3,5	10 - 12	Diragukan
2,0 - 3,0	7 - 10	Jelek
< 2,0	< 7	Sangat Jelek

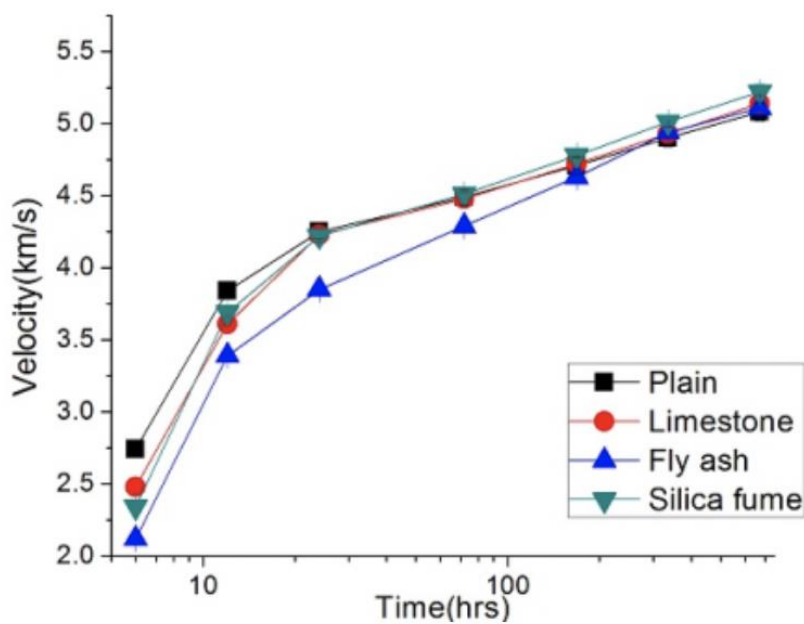
(Sumber: *International Atomic Energy Agency*, 2002)

2.6 Kuat Tekan Beton

Beton mempunyai kemampuan untuk menerima gaya tekan persatuan luas, ini yang disebut dengan kekuatan tekan (f'_c). Kekuatan tekan beton sangat tinggi namun beton memiliki kuat tarik yang lemah. Kuat tekan beton merupakan salah satu parameter untuk mengetahui kualitas beton. Kuat tekan beton dapat diketahui dengan cara pengujian pada benda uji yang berbentuk kubus dengan ukuran 150 x 150 x 150 mm atau silinder dengan diameter 150 mm dan tinggi 300 mm. Rata-rata nilai f'_c dapat dipengaruhi akibat bentuk benda uji, seperti benda uji silinder menghasilkan kuat tekan lebih rendah dari pada benda uji kubus. Selain bentuk juga dapat dipengaruhi oleh kualitas bahan penyusun, kerapatan, umur beton, dan campuran pada beton. Kuat tekan beton akan semakin bertambah seiring dengan berkurangnya faktor air-semen atau nilai w/c (Mattacchione & Mattacchione, 1995).

2.7 Hubungan Kuat Tekan dengan Kerapatan Beton

Pengujian UPV mempunyai fungsi utama yaitu untuk mengetahui kualitas beton berdasarkan cepat rambat gelombang yang dipengaruhi oleh kerapatan beton. Dari pengujian UPV kita tidak memperoleh hasil kuat tekan beton secara langsung, namun kita dapat memperoleh nilainya karena kuat tekan berhubungan (berbanding lurus) dengan kerapatan beton maka korelasi antara kuat tekan beton dan cepat rambat gelombang dapat didapatkan. Dari penelitian sebelumnya oleh B. Sanish & Santhanam (2012) telah meneliti cepat rambat gelombang pada sampel beton dengan umur yang berbeda – beda hingga umur beton mencapai 28 hari. Penelitian tersebut membuktikan bahwa bahwa penambahan cepat rambat terhadap umur beton lebih tinggi pada umur awal beton, dan grafik akan semakin landa pada umur akhir beton, seperti pada grafik hubungan kuat tekan dengan umur beton.



Gambar 2.9 Perubahan cepat rambat pada beton plain dan beton dengan admixture terhadap umur beton.

Sumber: B. Sanish & Santhanam (2012)

Menurut Gregor Trtnik, pendekatan konvensional untuk memperoleh hubungan matematis dengan cara analisis regresi belum tentu berhasil. Beberapa rumus hubungan antara kuat tekan beton, S (MPa) dengan UPV, V_p (km/s) dari beberapa percobaan terdahulu seperti pada tabel 2.5. Umumnya hubungan empiris terhadap uji non-destructive merupakan dasar dari evaluasi dari kuat tekan beton. Dimana a dan b adalah parameter empiris yang ditentukan oleh kuadrat terkecil.

$$S = a \exp(bV_p)$$

Tabel 2.5 Hubungan kuat tekan beton dan UPV

Persamaan	R ²	Sumber
$S = 1.146\exp(0.77V_p)$	0,8	Turgut (2004)
$S = 1.19\exp(0.715V_p)$	0,59	Nashn't et al. (2005)

(Sumber: Trtnik et al 2007)

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang dimulai pada bulan Mei 2018 sampai selesai.

3.2 Peralatan dan Bahan Penelitian

Beberapa peralatan dan bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi alat untuk mempersiapkan material hingga proses pengujian benda uji pada akhirnya. Peralatan yang digunakan berada di Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

3.2.1 Beton Porous

Beton porous dengan menghilangkan penggunaan agregat halus dan menggunakan cetakan silinder diameter 15 cm dengan tinggi 30 cm. Kekuatan tekan beton porous bervariasi antara 70 kg/m^2 sampai dengan 140 kg/m^2 .

3.2.1.1 Alat Penelitian

1. Cetakan silinder pipa
2. Mesin pengaduk beton
3. Timbangan dengan kapasitas 150 kg ketelitian 100 gr
4. Timbangan dengan kapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gr
5. Mesin *Los Angeles (LA)* dengan spesifikasi putaran 30-33 rpm, tanpa menggunakan bola-bola baja
6. Satu set alat *permeabilitas*.
7. Satu set ayakan untuk analisa gradasi agregat
8. Plastik dan karet gelang untuk proses curing
9. Ember
10. Sekop dan cetok

11. Gergaji
12. Kain lap penyerap air
13. Satu set alat pemeriksa *slump* beton
14. Bejana untuk pengujian Density
15. Jangka sorong dan mistar pengukur

3.2.1.2 Bahan Penelitian

1. Semen *Portland Pozzoland*
2. Air PDAM Kota Malang
3. Agregat Kasar Daur Ulang (RCA)
4. Agregat Kasar Alam (NCA)
5. *Silica Fume*
6. *Fly Ash*

3.2.2 Beton Agregat Kasar Daur Ulang (RCA)

Pada penelitian ini agregat yang digunakan adalah agregat kasar alam dan agregat kasar daur ulang dengan presentase komposisi RCA yang akan digunakan yaitu 50% dan 100% terhadap NCA. Ukuran agregat yang digunakan yaitu dengan gradasi 0,5 sampai 2 cm. Dimensi beton diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Dengan kekuatan tekan beton sebesar 20 Mpa.

3.2.2.1 Alat Penelitian

1. Satu set ayakan untuk analisis agregat, baik agregat kasar maupun agregat halus.
2. Timbangan dengan kapasitas 150 kg dengan ketelitian 100 gr.
3. Timbangan dengan kapasitas 5 kg dengan ketelitian 1 gr.
4. Sendok semen.
5. Talam.
6. Cetakan beton
7. Mistar pengukur.
8. Jangka Sorong.
9. Gerobak Pengangkut.
10. Mesin pencampur beton (*concrete mixer*).
11. Satu set alat uji slump beton.

12. Mesin untuk uji tekan beton (Compression Testing Machine /Compressometer) dengan kapasitas maksimum gaya tekan hingga 5000 KN

3.2.2.2 Bahan Penelitian

1. Agregat Halus (Pasir)
2. Agregat Kasar Alam (NCA)
3. Agregat Kasar Daur Ulang (RCA)
4. Semen, *Portland Pozzolan Cement* (PPC) jenis 1
5. Air PDAM Kota Malang

3.2.3 Beton Pumice Serat Kaleng

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beton silinder yang dicampur dengan serat kaleng kemasan dengan fraksi 10% terhadap volume beton silinder. Dengan panjang serat 4 cm dan lebar 2 mm. serta dalam penelitian ini menggunakan agregat kasar campur yaitu batu pecah dan batu *pumice* yang memiliki perbandingan 25% terhadap volume agregat kasar pada silinder beton. Dimensi beton diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Dengan kekuatan tekan beton sebesar 17 Mpa.

3.2.3.1 Alat Penelitian

1. Satu set ayakan (*siever*) untuk menganalisis gradasi agregat kasar maupun agregat halus.
2. Wadah berbentuk silinder untuk pemeriksaan berat ini agregat.
3. Keranjang besi dilengkapi dengan alat penggantung keranjang unntuk pengujian *specific gravity* dan penyerapan agregat kasar.
4. Piknometer kapasitas 500 gram untuk pengujian *specific gravity* agregat halus.
5. Oven untuk mengeringkan agregat kasar dan halus dalam pengujian *specific gravity*.
6. Cetakan silinder (*bekisting*) dengan diameter daam 15 cm dan tinggi 30 cm yang terbuat dari besi untuk mencetak beton yang digunakan sebagai benda uji.
7. Pengaduk beton (*concrete mixer*) untuk mengaduk bahan-bahan penyusun beton silinder berserat agar membentuk campuran yang homogen.
8. Alat uji *slump* untuk mengukur nilai slump dari adukan beton. Alat ini terbuat dari besi berbentuk kerucut dengan tinggi 30 cm, diameter atas 10 cm, diameter bawah 20 cm dan dilengkapi dengan alat tumbuk berupa tongkat besi sepanjang 60 cm dengan diameter 16 mm.

9. Alat uji tekan (compression machine) untuk mengukur tekanan yang mampu ditahan benda uji hingga mengalami retak serta mengetahui kuat tarik belah oleh benda uji hingga mengalami retak.
10. Alat untuk memotong fiber kaleng bekas kemasan yang terdiri dari gunting untuk membuka kaleng dan alat pemotong kertas untuk memotong lembaran kaleng bekas kemasan menjadi fiber berukuran 0,2 cm x 4 cm.

3.2.3.2 Bahan Penelitian

1. Serat dari kaleng kemasan minuman dengan panjang 4cm dan lebar 2 mm yang telah dibuat variasi yaitu dengan pilin A dan pilin B
2. Portland pozzoland cement (PPC)
3. Agregat halus berupa pasir
4. Agregat kasar berupa kerikil dan batu apung (*pumice*) yang telah dilapis cat.
5. Cat pelapis keramik
6. Air

3.2.4 Beton Fiber

Benda uji yang digunakan dalam penelitian ini merupakan beton silinder yang dicampur dengan serat kaleng. Serat kaleng yang digunakan dalam penelitian ini adalah berukuran lebar 0,5mm– 2,5 mm dengan panjang 6 cm dan 4 cm, serta dalam penelitian ini menggunakan agregat kasar campur yaitu batu pecah. Dimensi beton diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Dengan kekuatan tekan beton sebesar 17 Mpa.

3.2.4.1 Alat Penelitian

1. Ayakan
2. Mesin pencampur beton (*concrete mixer*)
3. Tongkat pemadat
4. Alat uji *slump*
5. Alat Uji Tekan Silinder
6. Alat Uji Tarik belah Silinder
7. Karung Goni
8. UTM
9. LVDT
10. Cangkul
11. Sekrop

12. Pemotong kertas
13. Penggaris
14. Spidol
15. Timbangan digital dengan ketelitian 0,1 – 10 gr.
16. Cetakan silinder (*bekisiting*) dengan diameter dalam 15 cm dan tinggi 30 cm yang terbuat dari besi untuk mencetak beton yang digunakan sebagai benda uji.

3.2.4.2 Bahan Penelitian

1. Portland Pozzoland Cement (PPC) semen gresik .
2. Serat dari kaleng dengan pasaran panjang 6 cm, 4cm dan lebar 0,5-2,5mm .
3. Agregat halus berupa pasir dari lumajang
4. Agregat kasar berupa batu pecah yang didapat dari pasaran
5. Air bersih dari PDAM kota Malang

3.3. UPV Test

Penelitian ini menggunakan alat UPV dengan merk Proceq tipe PL-200PE. Alat UPV ini berfungsi untuk mengetahui waktu transmisi dan cepat rambat gelombang ultrasonik melalui benda uji beton.

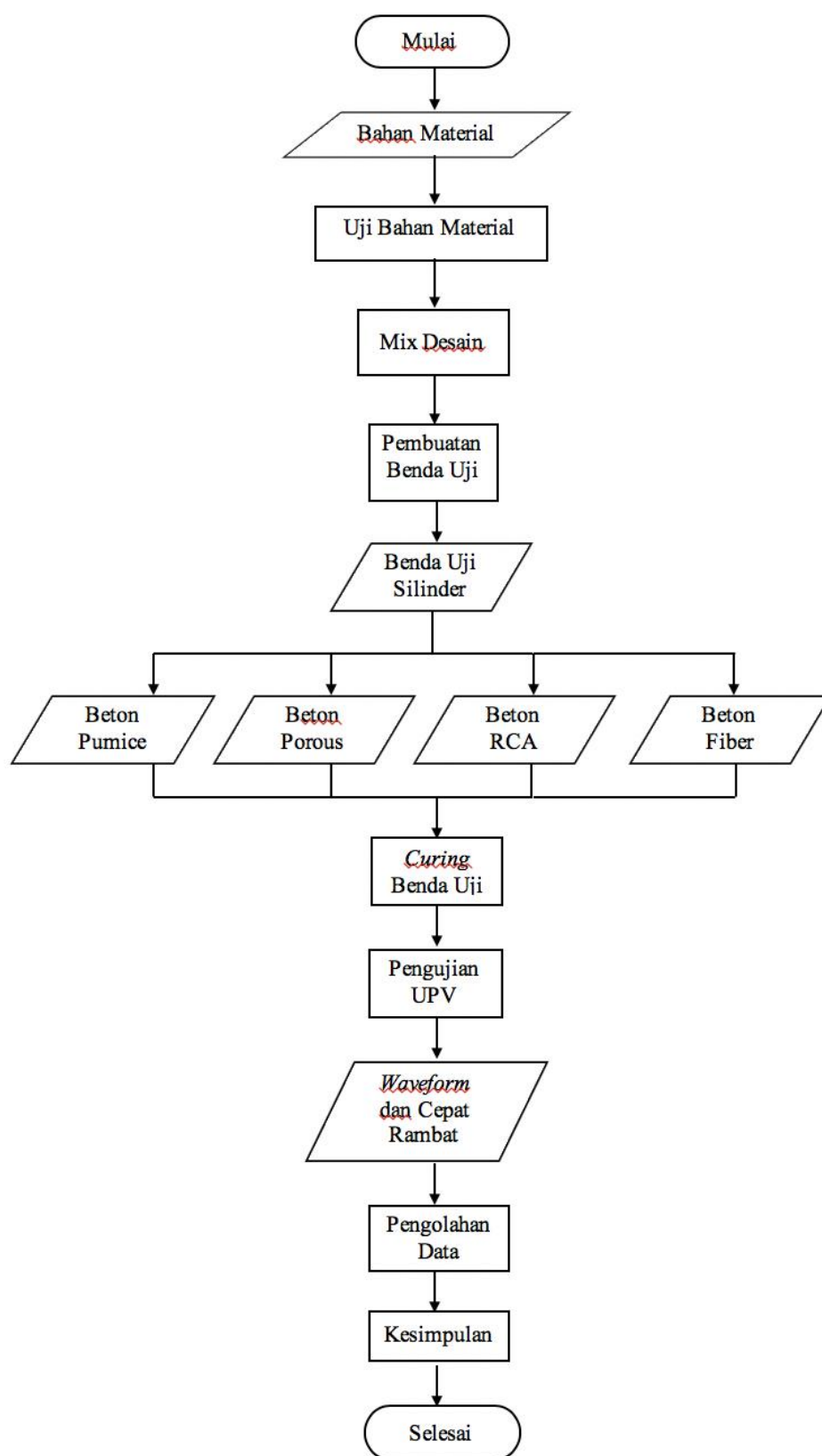
3.4 Uji Kuat Tekan

1. Bahan
Benda uji berupa beton silinder yang telah berumur 28 hari yang sudah di *capping*
2. Peralatan
 - a. *Compression Testing Machine*
 - b. Alat *Extensometer*
 - c. Tripod dan kamera
3. Pelaksanaan
 - a. Timbanglah benda uji
 - b. Mengatur alat *extensometer* pada benda uji, pastikan baut *extensometer* dipasang dengan kencang.
 - c. Letakkan benda uji pada alat *extensometer* pada *compression testing machine*
 - d. Lepaskan pengeang pada alat *extensometer* dan aturlah *dial extensometer* ke angka nol

- e. Siapkan kamera didepan *compression testing machine* untuk merekam perubahan yang terjadi pada *dial extensometer* selama pengujian
- f. Nyalakan *compression testing machine* dan atur agar kenaikan yang didapat konstan
- g. Rekamlah selama proses pengujian berlangsung, hingga benda uji hancur
- h. Setelah benda uji hancur, periksalah hasil dokumentasi dan catat *displacement longitudinal* yang terbaca pada *dial extensometer* setiap penambahan beban 10 kN.



3.5 Tahapan Penelitian



3.6 Rancangan Penelitian

Dalam penelitian ini menggunakan benda uji silinder sebagai benda uji utama. Benda uji silinder memiliki diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Masing masing benda jenis benda uji diberikan variasi pada jenis agregat kasar pada betonnya. Benda uji ini digunakan untuk pengujian UPV. Rincian benda uji terdapat pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Variasi Penelitian Beton

Beton	Semen	Air	Agregat Halus	Agregat Kasar	Ket.
Normal	1	0,6	2,1	3,0	-
Fiber Normal	1	0,5	2,1	2,9	Fiber kaleng sebesar 10%
Fiber Kait	1	0,5	2,1	2,9	Fiber kaleng sebesar 10%
Pumice Normal	1	0,6	2,1	3,2	25 % Agregat kasar adalah pumice
Pumice Fiber Normal	1	0,5	2,1	2,4	25 % Agregat kasar adalah pumice & Fiber kaleng sebesar 10%
Pumice Pilin A	1	0,5	2,1	2,4	25 % Agregat kasar adalah pumice & Fiber kaleng sebesar 10% dipilin 1x

Pumice Pilin B	1	0,5	2,1	2,4	25 % Agregat kasar adalah pumice & Fiber kaleng sebesar 10% dipilin 1,5x
Porous Normal	1	0,4	-	8,4	-
Porous 1	1	0,4	-	9,1	Silica Fume 7 %
Porous 2	1	0,6	-	11,3	Fly Ash 25 %
Porous Recycle	1	0,4	-	7,6	Agregat kasar menggunakan RCA 100%
Recycle	1	0,6	1,7	1,9	Agregat kasar menggunakan RCA 100%

3.7 Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang akan diukur adalah sebagai berikut:

- Variabel bebas (*independent variable*), yaitu variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti. Dalam penelitian ini, yang menjadi variabel bebas adalah variasi agregat kasar dalam perencanaan campuran beton (*mix design*) dari benda uji.
- Variabel terikat, yaitu variabel yang nilainya tergantung dari variabel bebas. Variabel terikat dari penelitian ini adalah nilai kecepatan pada beton.

3.8 Prosedur Penelitian

3.8.1 Pengujian Bahan Dasar

Pengujian bahan dasar yang akan digunakan mengacu pada buku petunjuk praktikum teknologi beton dari Laboratorium Struktur dan Bahan Konstruksi Jurusan Teknik Sipil Universitas Brawijaya. Bahan dasar yang diuji adalah variasi pada agregat kasarnya. Unsur-unsur dalam pengujian karakteristik agregat kasar meliputi: analisis butiran, pengujian berat jenis penyerapan, dan kadar air.

3.8.2 Pembuatan Benda Uji

Langkah-langkah pembuatan benda uji adalah sebagai berikut:

1. Bahan penyusun beton disiapkan dengan kuantitas sesuai mix desain.
2. Bahan-bahan tersebut dimasukkan ke dalam alat pengaduk kemudian diaduk selama kurang lebih 15 menit hingga campuran menjadi homogen.
3. Setelah pengadukan, diambil sebagian adonan beton untuk dilakukan pengujian *slump*.
4. Cetakan disiapkan dengan memberikan lapisan tipis dari oli.
5. Campuran beton dituang ke dalam cetakan silinder dan kubus.

3.8.3 Perawatan Benda Uji

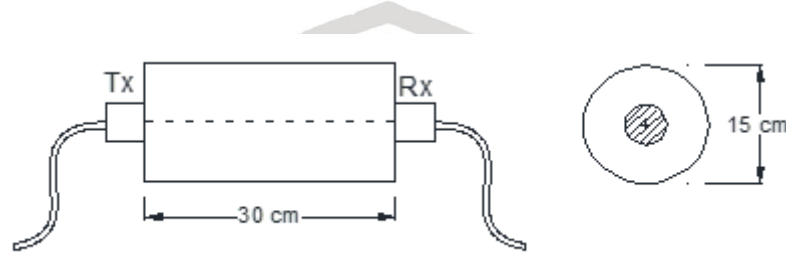
Setelah 24 jam cetakan benda uji silinder dan kubus dibuka dan dilakukan perawatan dengan tujuan agar semen terhidrasi dengan sempurna. Perawatan benda uji meliputi dua cara antara lain:

1. Benda uji direndam dalam bak berisi air dengan suhu $23^{\circ}\text{C} - 28^{\circ}\text{C}$.
2. Benda uji diselimuti dengan karung goni basah dan tiap hari dibasahi terus menerus dengan air.

Waktu perawatan benda uji disamakan setiap variasi benda uji sesuai dengan waktu pengecorannya. Pada penelitian ini perawatan beton dihentikan dua minggu (14 hari) setelah tanggal pengecoran.

3.8.4 Pengujian UPV

Pada penelitian ini pengujian UPV dilakukan dengan menggunakan alat Pundit PL-200. Pengujian dilakukan pada benda uji beton yang telah berumur 28 hari. Pengambilan data dilakukan dengan metode *direct* yaitu dengan menempatkan *transducer* pada titik tengah permukaan atas dan bawah dari benda uji silinder dan kubus seperti terlihat pada gambar 3.2. Pada penelitian menggunakan *transducer* standar dengan frekuensi 54 kHz. Hasil yang didapatkan dari pengujian UPV berupa cepat rambat, waktu transmisi, amplitudo, serta *waveform* atau bentuk dari gelombang yang diterima oleh *receiver transducer*.



Gambar 3.2 Skema titik pengujian UPV pada benda uji: (a) silinder dan (b) kubus.

Beberapa hal yang dilakukan dalam prosedur pengujian UPV antara lain:

1. Meratakan dan membersihkan permukaan beton.
2. Pada penelitian ini digunakan transduser standar dengan frekuensi 54 kHz.
3. Mengkalibrasi alat uji UPV dengan tujuan agar pembacaan waktu tempuh pada *transmitter* dan *receiver* sama, seperti ditunjukkan pada gambar 3.3. Kedua transduser ditempatkan pada kedua sisi *calibration rod* yang telah disediakan.
4. Menentukan jarak *transmitter* dan *receiver* pada layar Pundit PL-200.
5. Memberikan gel (*couplant*) pada permukaan kontak *transmitter* dan *receiver* setiap sebelum pengujian dimulai.
6. Pengujian dilakukan pada titik yang telah ditentukan sebelumnya
7. Pengujian UPV telah selesai dan didapatkan hasil berupa bentuk gelombang ultrasonik beserta waktu transmisi dan cepat rambatnya.

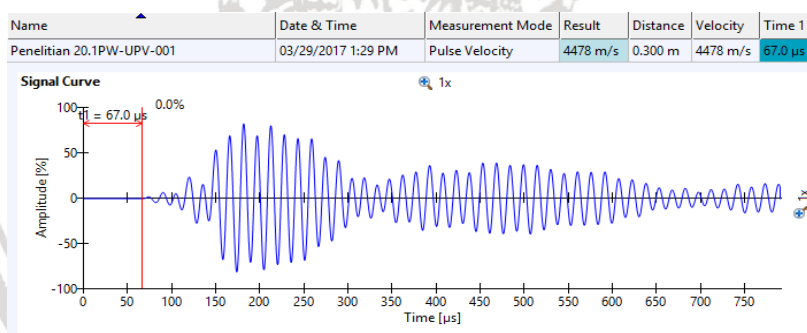


Gambar 3.3 Proses kalibrasi awal alat uji UPV.

3.9 Metode Analisis

3.9.1 Pengumpulan Data

Dari pengujian-pengujian yang telah dilakukan diambil beberapa data-data yang diperlukan. Pengujian UPV menghasilkan data berupa *waveform* dari gelombang yang diterima receiver pada setiap benda uji dan kemudian diolah menggunakan aplikasi PL-Link di komputer. Dari setiap *waveform* tersebut didapatkan beberapa parameter gelombang yaitu cepat rambat gelombang. Data-data tersebut kemudian dikelompokkan untuk masing-masing variasi kuat tekan dari beton.



Gambar 3.4 Tampilan data hasil pengujian UPV menggunakan aplikasi PL-Link.

3.9.2 Pengolahan Data

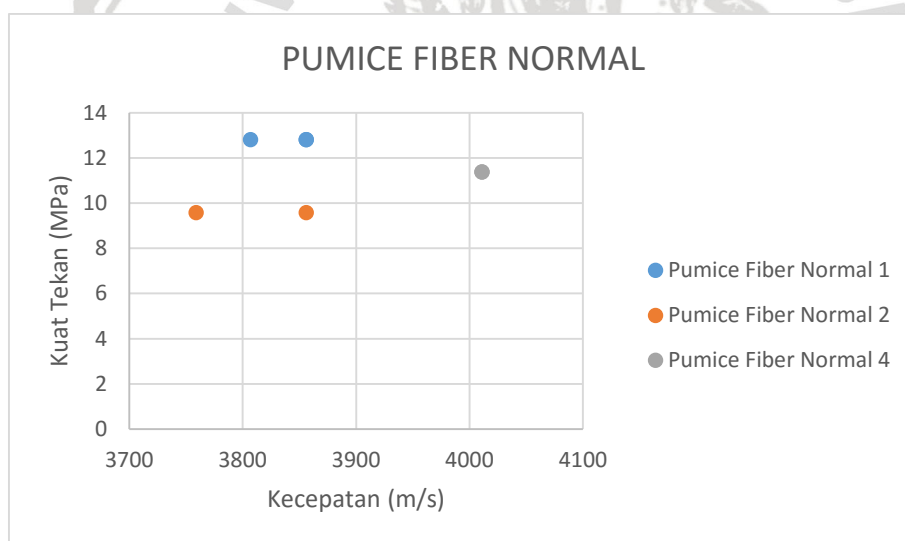
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kerapatan dari beton berdasarkan cepat rambat dan waktu transmisi menggunakan alat UPV. Pada penelitian ini parameter kerapatan beton didasarkan pada nilai kuat tekan dari beton. Data-data kuat tekan dan parameter gelombang yang telah diambil dari hasil pengujian kemudian dilakukan seleksi data dengan standar deviasi untuk membuang data-data yang menyimpang. Dari data-data

yang telah diseleksi kemudian disusun tabel dan grafik untuk mendapatkan hubungan dan korelasi antara parameter-parameter gelombang dengan kuat tekan dari beton.

Tabel 3.2

Hasil Perhitungan Kecepatan dan Kuat Tekan Beton

NO.	Name of Sample	Measurement Mode	Result (m/s)	Distance (m)	Kuat Tekan (Mpa)
1		Pulse Velocity			
2		Pulse Velocity			
3		Pulse Velocity			
4		Pulse Velocity			
5		Pulse Velocity			



Gambar 3.5 Tampilan grafik kecepatan dan kuat tekan beton

Dari data-data di atas diambil satu sampel yang dipakai sebagai acuan dalam perbandingan karakteristik beton. Kemudian dari seluruh data-data tersebut dikelompokkan berdasarkan nilai relatif terhadap sampel acuan untuk mengetahui hubungan kerapatan dengan karakteristik gelombangnya. Kemudian dari data tersebut dibuat persamaan regresi exponential dikarenakan beton mempunyai karakteristik banyak variable didalam kuat tekan beton sehingga menggunakan persamaan exponential.

3.9.3 Hipotesis

Berdasarkan hasil kajian pustaka, maka penelitian diharapkan akan memberikan hasil yaitu:

1. Terdapat korelasi hubungan yang kuat antara kuat tekan dan kecepatan pada beton variasi fiber.
2. Terdapat korelasi hubungan yang kuat antara kuat tekan dan kecepatan pada beton variasi pumice.
3. Terdapat korelasi hubungan yang kuat antara kuat tekan dan kecepatan pada beton variasi porous.
4. Terdapat korelasi hubungan yang kuat antara kuat tekan dan kecepatan pada beton variasi recycle.



BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Pembuatan Benda Uji

4.1.1 Perencanaan Campuran (*Mix Design*) Benda Uji

Benda uji yang digunakan pada penelitian ini ada 4 jenis beton yaitu: 1.) Beton variasi porous, 2.) Beton variasi agregat kasar daur ulang (*RCA*), 3.) Beton variasi agregat kasar batu apung (*Pumice*), dan 4.) Beton variasi fiber 4 buah. Benda uji berupa silinder dengan dimensi diameter 15 cm dan tinggi 30 cm. Masing-masing beton mempunyai variasi campuran (*mix design*) dengan kuat tekan rencana yang berbeda-beda. Perencanaan campuran beton dilakukan berdasarkan pedoman dari SNI-03-2834-2000 tentang Tata Cara Pembuatan Rencana Campuran Beton Normal. Hasil perhitungan proporsi kebutuhan bahan dari setiap variasi terdapat pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Kebutuhan Bahan untuk Campuran Benda Uji

Beton	Kuat Tekan Rencana (Mpa)	Semen	Air	Agregat Halus	Agregat Kasar
Normal	17	1	0,6	2,1	3,0
Fiber Normal	17	1	0,5	2,1	2,9
Fiber Kait	17	1	0,5	2,1	2,9
<i>Pumice</i> Normal	17	1	0,6	2,1	3,2
<i>Pumice</i> Fiber Normal	17	1	0,5	2,1	2,4
<i>Pumice</i> Pilin A	17	1	0,5	2,1	2,4
<i>Pumice</i> Pilin B	17	1	0,5	2,1	2,4
Porous Normal	14	1	0,4	-	8,4
Porous 1	14	1	0,4	-	9,1

Beton	Kuat Tekan Rencana (Mpa)	Semen	Air	Agregat Halus	Agregat Kasar
Porous 2	14	1	0,6	-	11,3
Porous Recycle	14	1	0,4	-	7,6
Recycle	20	1	0,6	1,7	1,9

Sumber: Hasil Perhitungan

Dari perencanaan campuran tersebut dilakukan proses pembuatan benda uji. Benda uji yang berhasil dibuat yaitu: 1.) Beton variasi porous sebanyak 4 buah, 2.) Beton variasi agregat kasar daur ulang (*RCA*) sebanyak 1 buah, 3.) Beton variasi agregat kasar batu apung (*Pumice*) sebanyak 4 buah, dan 4.) Beton variasi fiber 4 buah. Setelah proses pengecoran, dilakukan proses perawatan atau *curing* kemudian dilakukan pengujian pada saat umur beton 28 hari. Hasil perencanaan variasi campuran benda uji terdapat pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Variasi Campuran Benda Uji

Beton	Keterangan
Normal	-
Fiber Normal	Fiber kaleng sebesar 10%
Fiber Kait	Fiber kaleng sebesar 10%
<i>Pumice</i> Normal	25 % Agregat kasar adalah pumice
<i>Pumice</i> Fiber Normal	25 % Agregat kasar adalah pumice & Fiber kaleng sebesar 10%
<i>Pumice</i> Pilin A	25 % Agregat kasar adalah pumice & Fiber kaleng sebesar 10% dipilin 1x
<i>Pumice</i> Pilin B	25 % Agregat kasar adalah pumice & Fiber kaleng sebesar 10% dipilin 1,5x

Beton	Keterangan
Porous Normal	-
Porous 1	Silica Fume 7 %
Porous 2	Fly Ash 25 %
Porous Recycle	Agregat kasar menggunakan RCA 100%
Recycle	Agregat kasar menggunakan RCA 100%

Sumber: Hasil Perhitungan

4.2 Hasil Pengujian Kuat Tekan Menggunakan Uji Tekan

Pengujian kuat tekan dilakukan pada seluruh benda uji. Pengujian tekan menggunakan *Compression Test Machine* bertujuan untuk mendapatkan beban maksimum yang dapat ditahan oleh benda uji, sehingga dapat dihitung kuat tekan dari beton tersebut. Pengujian dilakukan pada saat beton berumur 28 hari, sehingga tidak perlu dikali dengan faktor koreksi kuat tekan terhadap umur beton. Hasil pengujian kuat tekan untuk benda uji silinder terdapat pada tabel 4.3. Adapun cara menghitung kuat tekan benda uji silinder (f'_c) yaitu menggunakan rumus (4-1) sebagai berikut, dengan luasan bidang tekan (A) yang dipakai yaitu luas lingkaran dengan diameter 15 cm.

$$f'_c = \frac{P}{A} \dots \dots \dots (4-1)$$

Dengan:

f'_c = kuat tekan (MPa)

P = beban maksimum (N)

A = luas bidang tekan (mm^2)

4.2.1 Beton Normal

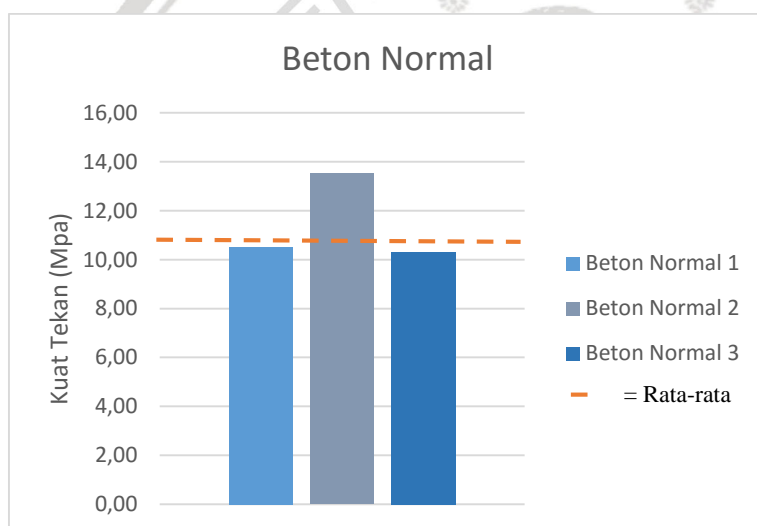
Pada pengujian kuat tekan beton normal didapatkan kuat tekan beton yang berbeda-beda. Namun kuat tekan yang didapat antara sampel beton satu dengan lainnya mempunyai nilai yang selisihnya tidak terlalu jauh. Rata-rata kuat tekan beton yang didapatkan antara 10 Mpa sampai dengan 14 Mpa. Namun kuat tekan ketiga sampel beton normal tersebut

mempunyai nilai dibawah kuat tekan rencana yang telah direncanakan saat *mix design* yaitu 17 Mpa. Hasil pengujian kuat tekan beton normal dapat dilihat pada tabel 4.3.

Tabel 4.3 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Normal

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
Beton Normal	Beton Normal	1	10,52	11,450
		2	13,52	
		3	10,31	

Dari gambar grafik 4.1 didapatkan beton normal pada sampel 1 dan beton normal pada sampel 3 mempunyai nilai kuat tekan yang hampir sama yaitu 10,52 Mpa dan 10,31 Mpa. Sedangkan untuk beton normal sampel 2 mendapatkan nilai kuat tekan yang lebih besar yaitu 13,52 Mpa. Rata-rata kuat tekan pada beton normal didapatkan sebesar 11,45 Mpa.



Gambar 4.1 Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Normal

4.2.2 Beton Fiber

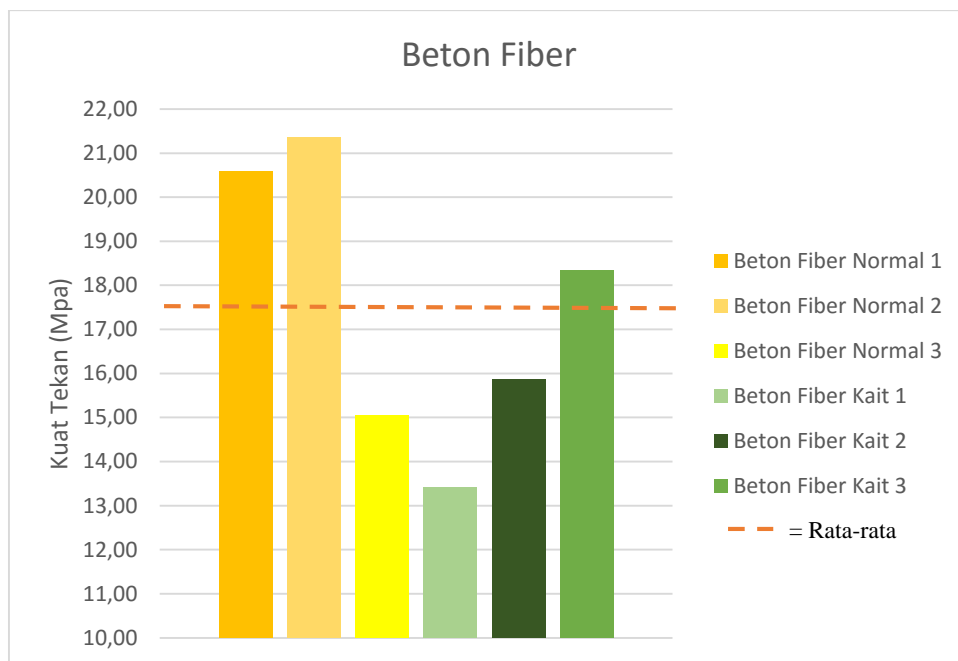
Pada beton variasi fiber terdapat dua macam benda uji yaitu beton fiber normal dan beton fiber kait. Setiap benda uji terdapat 3 sampel beton dan pada setiap sampel beton dilakukan beberapa kali pengujian. Saat dilakukan pengujian kuat tekan hasil yang didapat cukup baik. Beberapa sampel nilai yang didapat mendekati kuat tekan rencana yaitu 17 Mpa. Pada beton fiber normal dari 3 sampel yang ada, terdapat 2 sampel yang mendapat nilai kuat tekan diatas kuat tekan rencana. Dapat dilihat bahwa rata-rata beton variasi fiber mempunyai

kuat tekan diatas beton normal. Hasil pengujian kuat tekan beton variasi fiber dapat dilihat pada tabel 4.4.

Tabel 4.4 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Fiber

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
Beton Fiber	Beton Fiber Normal	1	20.58	18.993	17.432
		2	21.35		
		3	15.05		
	Beton Fiber Kait	4	13.41	15.870	
		5	15.87		
		6	18.33		

Dari gambar grafik 4.2 didapatkan pada benda uji beton fiber normal pada sampel 1 dan beton fiber normal sampel 2 memiliki nilai kuat tekan yang hampir tidak jauh berbeda yaitu 20,58 Mpa dan 21,35 Mpa. Sedangkan untuk beton fiber normal sampel 3 memiliki nilai kuat tekan yang lebih kecil yaitu sebesar 15,05 Mpa. Dengan nilai kuat tekan yang didapatkan untuk beton fiber normal didapatkan rata-rata diatas dari kuat tekan rencana yaitu 17 Mpa. Sedangkan untuk beton fiber kait sampel 6 mendapatkan nilai kuat tekan sebesar 18,33 yang lebih tinggi dari kuat tekan rencana yaitu 17 Mpa. Sedangkan sampel 4 dan sampel 5 mendapat nilai kuat tekan yang lebih kecil dari sampel lainnya yaitu sebesar 13,41 Mpa dan 15,87 Mpa. Rata-rata kuat tekan pada beton fiber didapatkan sebesar 17,432 Mpa. Nilai kuat tekan yang didapat pada beton fiber lebih tinggi dibanding dengan beton normal acuan sebesar 17 Mpa. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh fiber pada campuran beton. Adanya serat fiber kaleng akan menambah kekuatan kuat tekan pada beton. Namun variasi *fiber* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap kuat tekan beton.



Gambar 4.2 Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Fiber

4.2.3 Beton Pumice

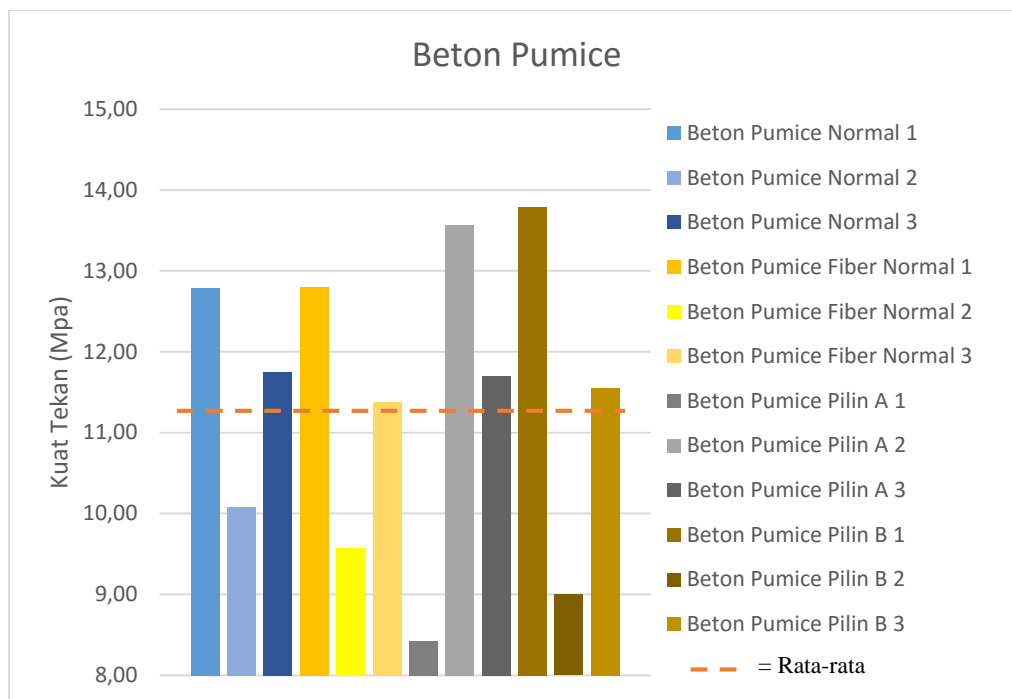
Pada beton variasi pumice terdapat empat macam benda uji. Setiap benda uji mempunyai kuat tekan yang berbeda-beda. Untuk hasil kuat tekan dari beton variasi pumice untuk semua sampel beton rata-rata mempunyai kuat tekan dibawah kuat tekan rencana yaitu 17 Mpa. Rata-rata kuat tekan yang didapat mempunyai hasil kuat tekan sebesar 8 Mpa sampai dengan 13 Mpa. Hasil pengujian kuat tekan beton variasi pumice dapat dilihat pada tabel 4.5.

Tabel 4.5 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Pumice

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
Beton Pumice	Beton Pumice Normal	1	12.78	11.540	11.367
		2	10.09		
		3	11.75		
	Beton Pumice Fiber Normal	4	12.80	11.251	
		5	9.57		
		6	11.38		
	Beton Pumice Pilin A	7	8.42	11.230	
		8	13.57		
		9	11.70		
		10	13.79		
		11	9.00		

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
	Beton	12	11.55		
	Pumice Pilin B				

Dari gambar grafik 4.3 didapatkan pada benda uji beton pumice normal sampel 1, beton pumice normal sampel 2 dan beton pumice normal sampel 3 mempunyai nilai kuat tekan masing-masing sebesar 12,78 Mpa, 10,09 Mpa dan 11,75 Mpa. Untuk beton pumice fiber normal sendiri masing masing sampel mempunyai kuat tekan sebesar 12,80 Mpa, 9,57 Mpa, dan 11,38 Mpa. Untuk beton pumice pilin A masing-masing sampel mempunyai kuat tekan sebesar 8,42 Mpa, 13,57 Mpa, dan 11,70 Mpa. Sedangkan untuk beton pumice pilin B masing-masing sampel mempunyai kuat tekan sebesar 13,79 Mpa, 9,00 Mpa, dan 11,55 Mpa. Untuk beton pumice normal memiliki kuat tekan lebih tinggi dibanding beton acuan atau beton normal yaitu sebesar 11,54 Mpa. Sedangkan untuk beton pumice fiber normal memiliki kuat tekan lebih kecil dibanding beton acuan. Untuk beton pumice pilin A memiliki nilai kuat tekan lebih kecil dibanding dengan beton acuan atau beton normal. Dan untuk beton pumice pilin B memiliki nilai kuat tekan lebih tinggi dibanding beton acuan atau beton normal. Semua hasil kuat tekan yang diperoleh pada beton variasi pumice memiliki kuat tekan yang lebih kecil dari pada kuat tekan rencana yaitu sebesar 17 Mpa. Rata-rata kuat tekan pada beton pumice didapatkan sebesar 11,367 Mpa. Nilai kuat tekan pada beton pumice lebih kecil dari pada kuat tekan beton acuan atau normal. Adapun beton yang mendapat nilai yang lebih tinggi dari beton normal atau acuan yaitu pumice pilin B. Hal ini dikarenakan adanya pengaruh fiber kaleng pada beton tersebut walaupun nilainya tidak signifikan.



Gambar 4.3 Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Pumice

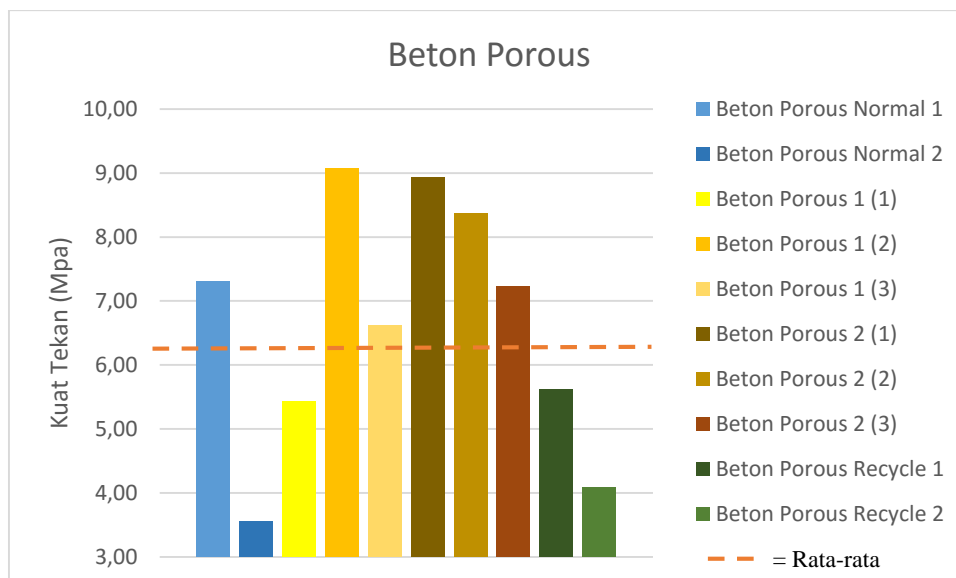
4.2.4 Beton Porous

Beton variasi porous memiliki empat macam benda uji. Setiap benda uji terdapat beberapa sampel beton dan dilakukan pengujian kuat tekan beton guna mendapatkan nilai kuat tekan pada beton tersebut. Hasil kuat tekan dari beton variasi porous memiliki berbagai macam nilai kuat tekan yang didapat. Pada beton porous rata-rata nilai kuat tekan yang didapat jauh dari kuat tekan rencana yang telah di rencanakan saat *mix design* yaitu 14 Mpa. Hasil pengujian kuat tekan beton variasi porous dapat dilihat pada tabel 4.6.

Tabel 4.6 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Porous

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
Beton Porous	Beton	1	7.31	5.434	6.377
	Porous	2	3.56		
	Normal				
	Beton	3	5.43	7.041	
	Porous 1	4	9.07		
		5	6.62		
	Beton	6	8.94	8.180	
	Porous 2	7	8.37		
		8	7.23		
	Beton	9	5.62	4.855	
Porous	10	4.09			
Recycle					

Dari gambar grafik 4.4 didapatkan pada benda uji beton porous normal sampel 1 dan beton porous normal sampel 2 mempunyai nilai kuat tekan masing-masing sebesar 7,31 Mpa dan 3,56 Mpa. Untuk beton porous 1 sendiri masing masing sampel mempunyai kuat tekan sebesar 5,43 Mpa, 9,07 Mpa dan 6,62 Mpa. Untuk beton porous 2 masing-masing sampel mempunyai kuat tekan sebesar 8,94 Mpa, 8,37 Mpa, dan 7,23 Mpa. Sedangkan untuk beton porous recycle masing-masing sampel mempunyai kuat tekan sebesar 5,62 Mpa dan 4,09 Mpa. Semua hasil kuat tekan yang diperoleh pada beton variasi porous memiliki kuat tekan yang lebih kecil dari pada kuat tekan rencana yaitu sebesar 14 Mpa. Rata-rata kuat tekan pada beton porous didapatkan sebesar 6,377 Mpa. Pada beton porous recycle memiliki nilai kuat tekan paling kecil dikarenakan pada beton RCA terdapat kandungan mortar yang dapat mengurangi kekuatan dari beton porous. Saat pengujian kuat tekan ada beberapa kendala saat dilakukan *capping* permukaan sampel beton yang tidak rata. *Capping* yang terpasang pada permukaan beton hanya terkena pada bagian agregat pada sisi-sisi tertentu saja. Kondisi ini dapat menyebabkan gaya tekan yang diterima tidak bisa merata secara maksimal pada seluruh luasan permukaan. Saat uji tekan keretakan yang terjadi pada beton porous ada dua penyebab keretakan, yaitu keretakan yang terjadi pada pasta semen dan keretakan yang terjadi pada agregat. Hal ini menunjukkan bahwa pasta campuran yang menggunakan *fly ash* maupun *silica fume* menjadi pengikat agregat terlepas karena luasan permukaan agregat yang kecil. Untuk kondisi agregat yang hancur dikarenakan agregat tidak bisa menahan gaya tekan. Dalam hal ini kekuatan agregat yang besar pada beton porous normal dari pada beton porous recycle.



Gambar 4.4 Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Porous

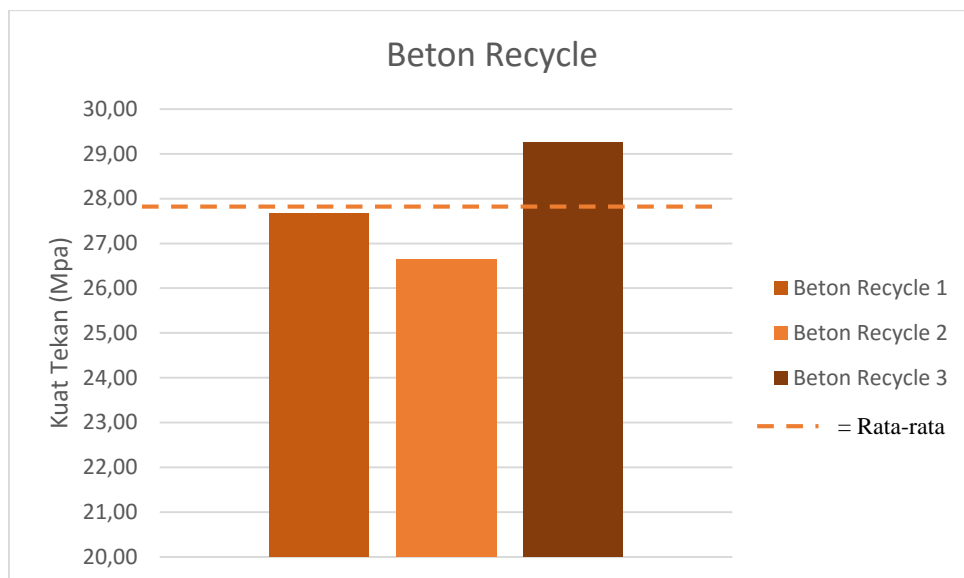
4.2.5 Beton Recycle

Beton variasi recycle mempunyai tiga sampel dan pada setiap sampelnya dilakukan pengujian kuat tekan. Dari ketiga sampel yang didapat semua hasil kuat tekan lebih tinggi dari kuat tekan rencana yaitu sebesar 20 Mpa. Rata-rata nilai kuat tekan yang didapat lebih dari 25 Mpa. Hasil pengujian kuat tekan beton variasi recycle dapat dilihat pada tabel 4.7.

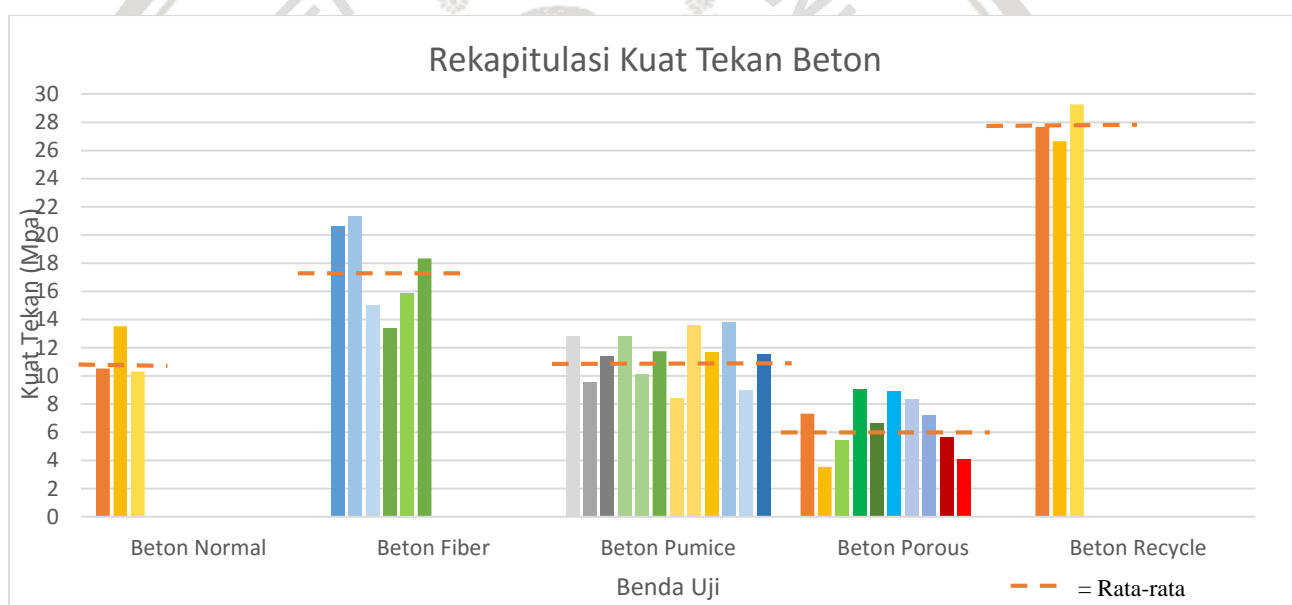
Tabel 4.7 Hasil Pengujian Kuat Tekan Beton Recycle

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	f'c (Mpa)	Rata-rata f'c (Mpa)
Beton Recycle	Beton Recycle	1	27,67	27,857
		2	26,65	
		3	29,25	

Dari gambar grafik 4.5 didapatkan pada benda uji beton recycle pada masing-masing sampel mempunyai kuat tekan yang berbeda-beda. Untuk beton recycle sampel 1 mempunyai kuat tekan sebesar 27,67 Mpa. Untuk beton recycle sampel 2 mempunyai kuat tekan sebesar 26,65 Mpa. Sedangkan untuk beton recycle sampel 3 mempunyai kuat tekan sebesar 29,25 Mpa. Semua hasil kuat tekan yang diperoleh pada beton variasi recycle memiliki kuat tekan yang lebih besar dari pada kuat tekan rencana yaitu sebesar 20 Mpa. Rata-rata kuat tekan pada beton recycle didapatkan sebesar 27,857 Mpa. Hal ini dikarenakan pada beton recycle menggunakan agregat kasar beton recycle mutu tinggi yaitu K250.



Gambar 4.5 Grafik Kuat Tekan Sampel Beton Recycle



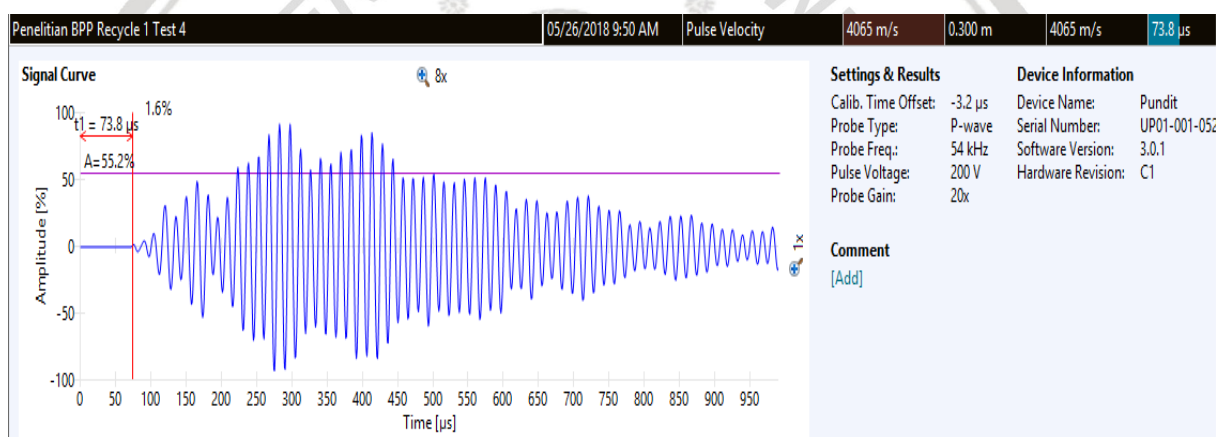
Gambar 4.6 Kuat Tekan Sampel Beton Silinder dengan Uji Tekan

Sumber: Hasil Penelitian

Hasil pengujian kuat tekan pada tabel 4.3 menunjukkan bahwa kuat tekan beton aktual sebagian besar lebih kecil dari kuat tekan rencana. Untuk beton normal sebesar 11,45 Mpa, untuk beton variasi fiber sebesar 17,432 Mpa, untuk beton variasi pumice sebesar 11,367 Mpa, untuk beton variasi porous sebesar 6,337 Mpa, dan beton recycle sebesar 27,857 Mpa. Hal ini dapat disebabkan oleh proses pengerjaan beton yang kurang sempurna baik pada saat pengadukan hingga proses vibrasi.

4.3 Hasil Pengujian *Ultrasonic Pulse Velocity* (UPV)

Pengujian UPV hanya dilakukan pada benda uji silinder (4 jenis beton). Pengujian dilakukan menggunakan alat PUNDIT PL-200 dari PROCEQ dengan menggunakan 2 (dua) mode pengukuran yaitu mode *transmission time* (TT) dan *pulse velocity* (PV) pada sampel yang sama. Pada penggunaan umum, kedua moda tersebut menghasilkan data yang berbeda, di mana output dari mode TT yaitu waktu transmisi gelombang sedangkan output dari mode PV yaitu cepat rambat gelombang. Namun pada penelitian ini menggunakan mode pengukuran yaitu *pulse velocity* (PV). Untuk mendapatkan cepat rambat gelombang yang perlu diinputkan pada alat yaitu jarak rambat, di mana pada penelitian ini yang menggunakan metode langsung (*direct method*) maka jaraknya yaitu tinggi silinder yaitu 30 cm yang kemudian dibagi dengan waktu. Mode tersebut menghasilkan output hasil kecepatan yang kemudian dianalisis menggunakan software PL-Link untuk mengambil parameter-parameter gelombang seperti yang terdapat pada tabel 2.4.



Gambar 4.7 Contoh Pengambilan Parameter Kecepatan

4.3.1 Pengukuran dengan Moda PV (*Pulse Velocity*)

Hasil pengujian untuk moda PV terdapat pada Tabel 4.4 sampai dengan 4.8. Berdasarkan data tersebut, menurut tabel 2.4 sampel beton tersebut dapat dikualifikasikan memiliki kualitas atau kerapatan yang baik dengan cepat rambat (*pulse velocity*) berkisar antara 3500 hingga 4500 m/s.

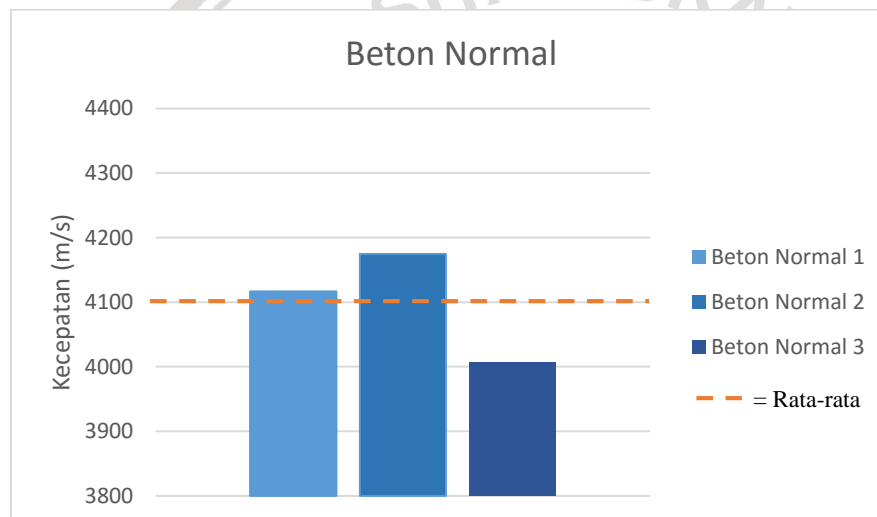
4.3.1.1 Beton Normal

Hasil pengujian dari beton normal didapatkan rata-rata kecepatan antara 4000m/s sampai dengan 4500 m/s. Terdapat 3 sampel benda uji pada beton variasi normal, dan pada setiap benda uji dilakukan beberapa kali pengujian. Pada semua sampel beton variasi normal

memiliki kecepatan lebih dari 4000 m/s yang dapat dikategorikan sebagai beton dengan kualitas baik menurut tabel 2.4.

Tabel 4.8 *Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity Beton Normal*

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Kecepatan	Rata-rata
			(m/s)	Kecepatan (m/s)
Beton Normal	Beton	1	4117	4117
		2	4233	4175
		3	4007	4007
	Normal	1	4117	4117
		2	4233	4175
		3	4007	4007



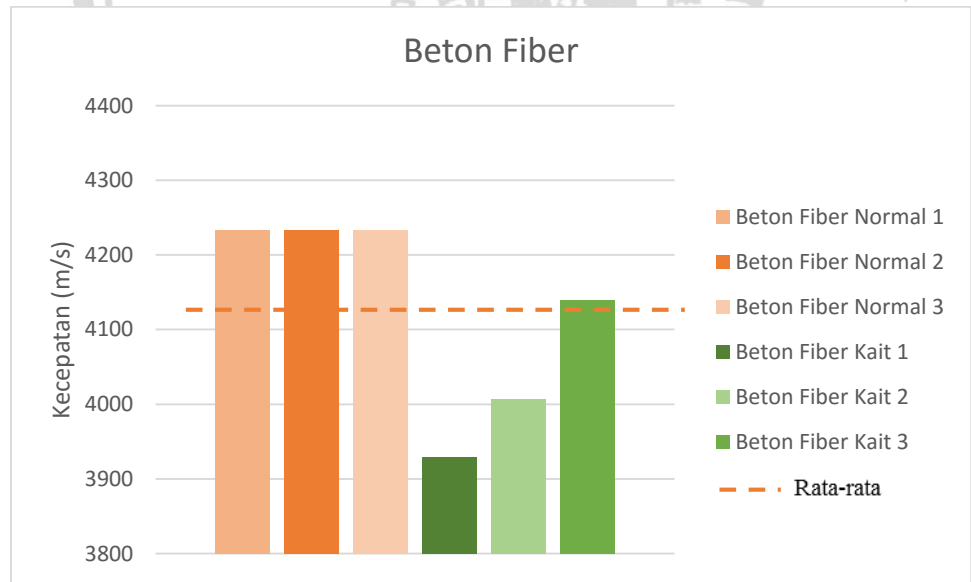
Gambar 4.8 Grafik Kecepatan Sampel Beton Normal

4.3.1.2 Beton Fiber

Pada beton variasi fiber terdapat dua macam benda uji yaitu beton fiber normal dan beton fiber kait. Setiap benda uji terdapat 3 sampel beton dan pada setiap sampel beton dilakukan beberapa kali pengujian. Dari hasil pengujian beton variasi fiber didapatkan rata-rata kecepatan antara 4000m/s sampai dengan 4500 m/s. Namun terdapat satu sampel benda uji beton fiber kait yang nilai kecepataannya dibawah 4000 m/s, yaitu beton fiber kait pada sampel pertama dengan nilai rata-rata kecepatan 3929 m/s. Dari rata-rata kecepatan yang didapat, beton fiber normal memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibanding dengan beton fiber kait, hal ini disebabkan karena kerapatan material penyusun pada beton fiber normal lebih tinggi dan memiliki rongga lebih sedikit dibandingkan dengan beton fiber kait.

Tabel 4.9 *Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity Beton Fiber*

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Kecepatan (m/s)	Rata-rata Kecepatan (m/s)
Beton Fiber	Beton Fiber Normal	1	4233	4233
			4233	
		2	4233	4233
			4233	
		3	4174	4234
			4293	
	Beton Fiber Kait	1	3954	3929
			3903	
		2	4007	4007
			4007	
		3	4117	4139
			4161	



Gambar 4.9 Grafik Kecepatan Sampel Beton Fiber

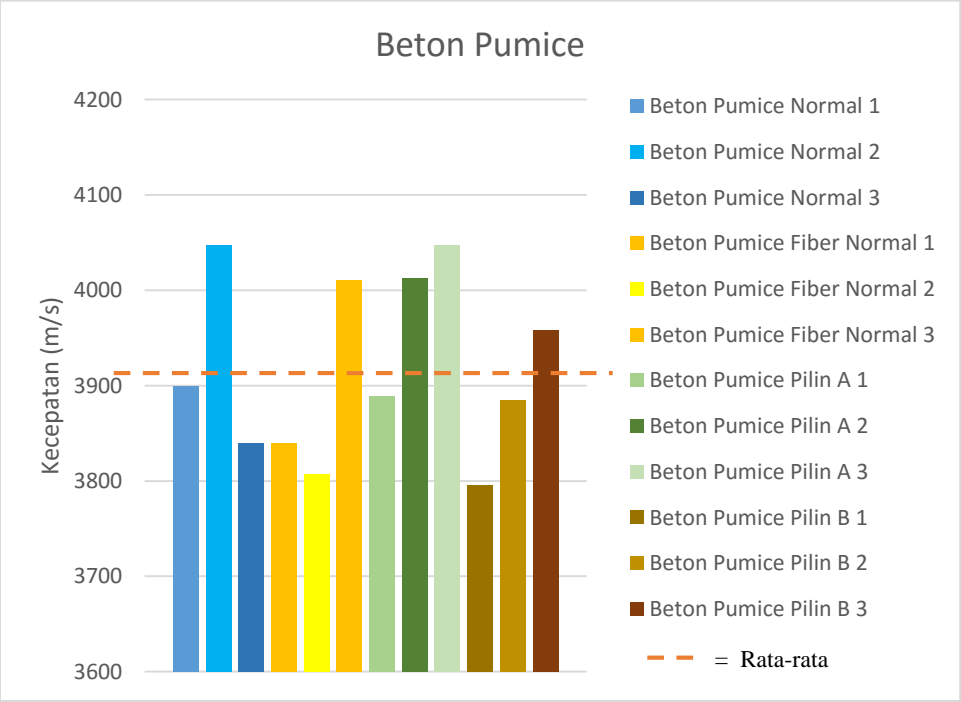
4.3.1.3 Beton Pumice

Beton variasi pumice memiliki empat macam benda uji. Pada setiap benda uji terdapat beberapa sampel beton dan dilakukan beberapa pengujian guna mendapatkan nilai kecepatan pada beton tersebut. Untuk hasil dari beton variasi pumice memiliki berbagai macam nilai kecepatan yang didapat. Pada beton pumice normal rata-rata kecepatan yang didapat 3500 m/s sampai dengan 4500 m/s. Sama halnya dengan beton pumice fiber normal dan beton pumice pilin A. Namun nilai yang didapat lebih banyak dibawah 4000 m/s. Sedangkan untuk pumice pilin B nilai yang didapat antara 3500 m/s sampai dengan 4000 m/s. Dari rata-rata kecepatan yang didapat, beton pumice pilin A memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibanding dengan beton pumice normal, beton pumice fiber normal, maupun beton pumice pilin B.

Tabel 4.10 *Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity* Beton Pumice

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Kecepatan (m/s)	Rata-rata Kecepatan (m/s)
Beton Pumice	Beton Pumice Normal	1	3623	3900
			4011	
			4065	
		2	4011	4047
			4065	
			4065	
		3	3856	3840
			3807	
			3856	
	Beton Pumice Fiber Normal	1	3807	3840
			3856	
			3856	
		2	3856	3808
			3759	
		3	4011	4011
			4011	
		1	3906	3889
			3856	

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Kecepatan (m/s)	Rata-rata Kecepatan (m/s)
Beton Pumice Pilin A	Beton	2	3906	4012
			3958	
			3958	
		3	4121	
			4011	
			4011	
	Beton Pumice Pilin B	1	3580	3796
			4011	
			4011	
		2	4065	
			3580	
			4011	
Beton Pumice Pilin B	Beton	3	3958	3958
			3958	
			3958	
	Beton Pumice Pilin A	1	3580	
			4011	
			4011	
	Beton Pumice Pilin B	2	4065	
			3580	
			4011	



Gambar 4.10 Grafik Kecepatan Sampel Beton Pumice

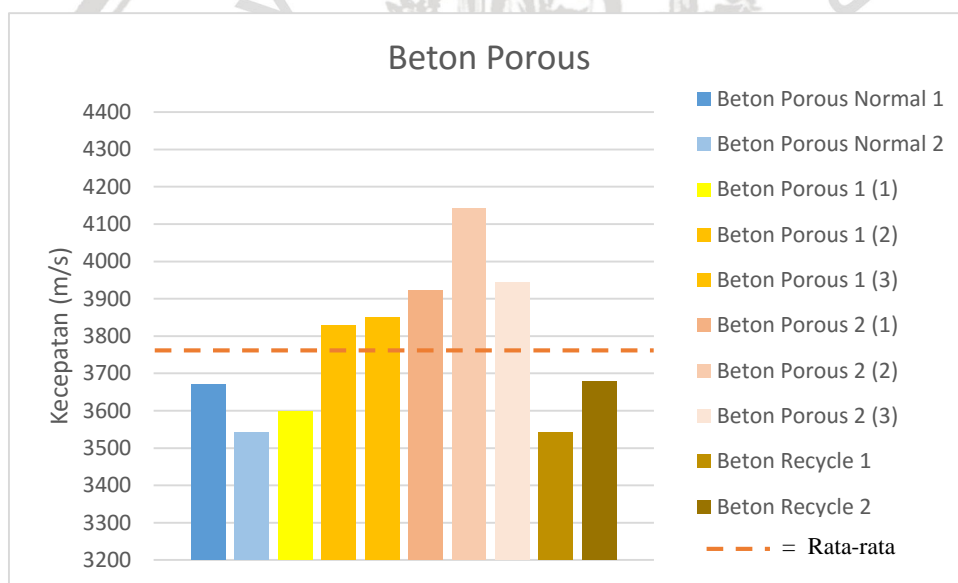
4.3.1.4 Beton Porous

Pada beton variasi porous memiliki empat macam benda uji. Pada setiap benda uji terdapat beberapa sampel beton dan dilakukan beberapa pengujian guna mendapatkan nilai kecepatan pada beton tersebut. Untuk hasil dari beton variasi porous memiliki berbagai macam nilai kecepatan yang didapat. Pada beton porous rata-rata kecepatan yang didapat lebih rendah dibanding dengan jenis variasi beton lainnya. Kecepatan yang didapat rata-rata 3500 m/s sampai dengan 4000 m/s. Namun ada beberapa sampel yang mempunyai kecepatan rendah yaitu dibawah 3500 m/s bahkan ada yang dibawah 3000 m/s yaitu pada beton porous normal sampel kedua. Dari rata-rata kecepatan yang didapat, beton porous 2 memiliki kecepatan yang lebih tinggi dibanding dengan beton porous normal, beton porous 1, maupun beton recycle. Hal ini disebabkan karena kerapatan material penyusun pada beton porous 2 lebih tinggi dan memiliki rongga lebih sedikit

Tabel 4.11 *Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity* Beton Porous

Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Kecepatan (m/s)	Rata-rata Kecepatan (m/s)
Beton Porous	Beton Porous Normal	1	3650	3670
			3741	
			3618	
		2	3560	3541
			3560	
			3503	
	Beton Porous 1	1	3618	3599
			3560	
			3618	
		2	3806	3828
			3873	
			3806	
		3	3873	3851
			3806	
			3873	
	Beton Porous 2	1	3741	3924

		4015	
		4015	
	2	4089	4141
		4167	
		4167	
	3	3873	3944
		3943	
		4015	
Beton Porous 1		3560	3541
Recycle		3560	
		3503	
	2	3618	3679
		3741	
		3679	



Gambar 4.11 Grafik Kecepatan Sampel Beton Porous

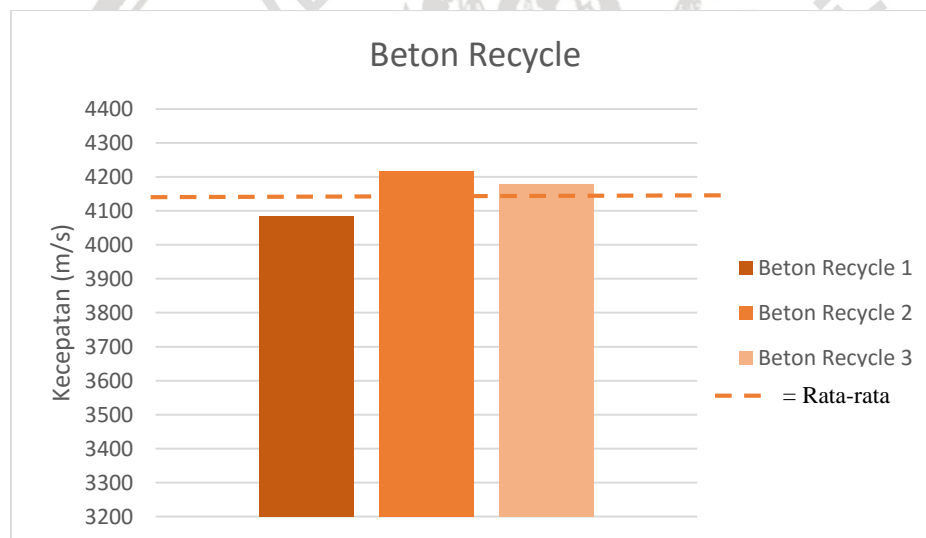
4.3.1.5 Beton Recycle

Beton variasi recycle mempunyai tiga sampel dan pada setiap sampelnya dilakukan beberapa pengujian untuk mendapatkan nilai kecepatan. Pengujian dari beton variasi recycle didapatkan rata-rata kecepatan antara 4000m/s sampai dengan 4500 m/s. Pada ketiga sampel beton variasi recycle semuanya memiliki kecepatan lebih dari 4000 m/s.

Tabel 4.12 *Rekapitulasi Data Parameter Pulse Velocity Beton Recycle*

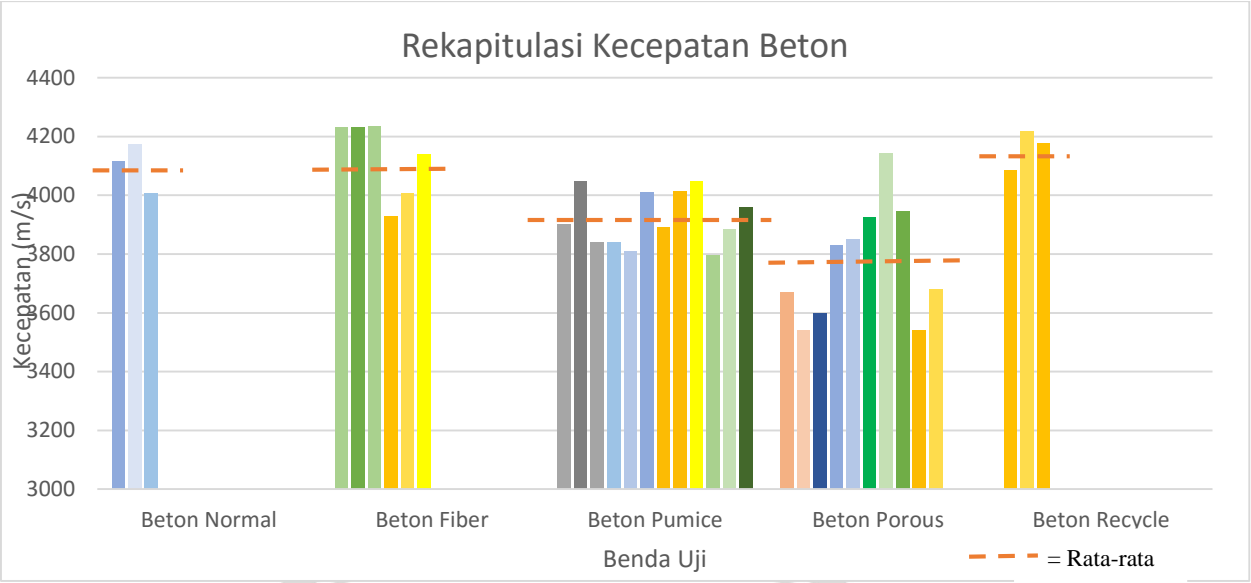
Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Kecepatan (m/s)	Rata-rata Kecepatan (m/s)
Beton Recycle	Beton Recycle	1	4065	4084
			4121	
			4065	
		2	4178	4217
			4237	
			4237	
		3	4178	4178
			4178	
			4178	

Sumber: Hasil Penelitian



Gambar 4.12 Grafik Kecepatan Sampel Beton Recycle

Dari data kecepatan yang telah didapat dari berbagai macam jenis variasi beton dapat dilihat bahwa kecepatan paling tinggi terdapat pada beton variasi fiber dengan rata-rata sebesar 4121 m/s dan beton variasi recycle sebesar 4160 m/s. Pada beton variasi pumice rata-rata berada pada kecepatan antara 3500 m/s sampai dengan 4000 m/s. Sedangkan untuk beton variasi porous mempunyai kecepatan yang paling rendah dengan rata-rata antara 3500 m/s sampai dengan 4000 m/s. Untuk beton acuan (beton normal) berada pada kecepatan dengan rata-rata 4100 m/s.



Gambar 4.13 Kecepatan Sampel Beton Silinder dengan Alat UPV

Sumber: Hasil Penelitian

4.4 Hubungan Antara Kuat Tekan Beton dengan Parameter Gelombang

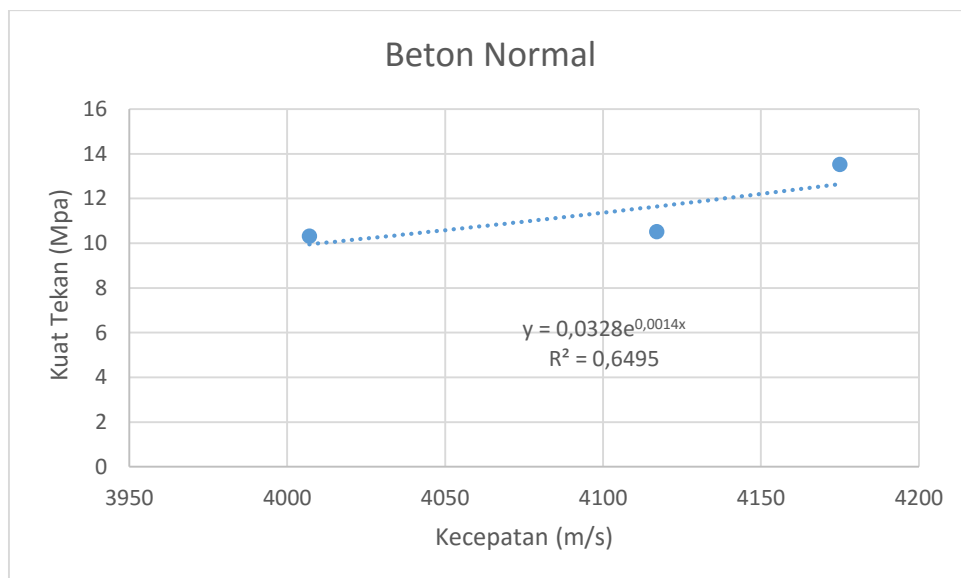
Setelah data-data didapat, kemudian setiap benda uji dirata-rata untuk dapat dicari hubungan antara kuat tekan beton dengan kecepatan gelombang. Perbandingan antara kuat tekan dan kecepatan gelombang disajikan pada tabel 4.9.

Tabel 4.13 Rekapitulasi Data Kuat Tekan dan Kecepatan

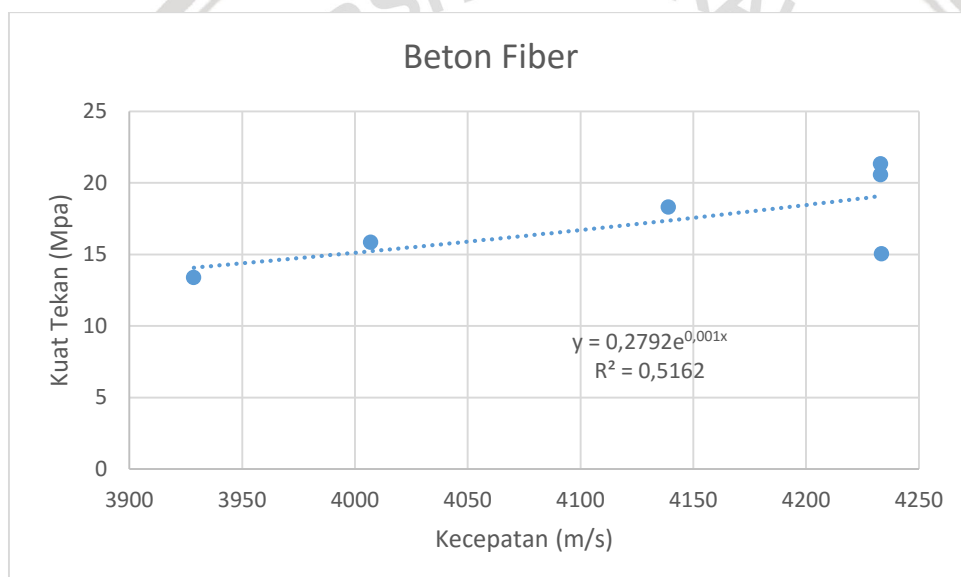
Jenis Beton	Benda Uji	Sampel	Rata-rata Kuat Tekan (Mpa)	Rata-Rata Kecepatan (m/s)
Beton Normal	Beton Normal	1	10.52	4117
		2	13.52	4175
		3	10.31	4007
Beton Fiber	Beton Fiber Normal	1	20.58	4233
		2	21.35	4233
		3	15.05	4234
	Beton Fiber Kait	4	13.41	3929
		5	15.87	4007
		6	18.33	4139
	Beton Pumice Normal	1	12.78	3900

Beton Pumice	Beton Pumice Fiber Normal	2	10.09	4047
		3	11.75	3840
		4	12.80	3840
		5	9.57	3808
		6	11.38	4011
		7	8.42	3889
		8	13.57	4012
		9	11.70	4048
		10	13.79	3796
		11	9.00	3885
		12	11.55	3958
Beton Porous	Beton Porous Normal	1	7.31	3670
		2	3.56	3541
	Beton Porous 1	3	5.43	3599
		4	9.07	3828
		5	6.62	3851
	Beton Porous 2	6	8.94	3924
		7	8.37	4141
		8	7.23	3944
	Beton Porous Recycle	9	5.62	3541
		10	4.09	3679
Beton Recycle	Beton Recycle	1	27.67	4084
		2	26.65	4217
		3	29.25	4178

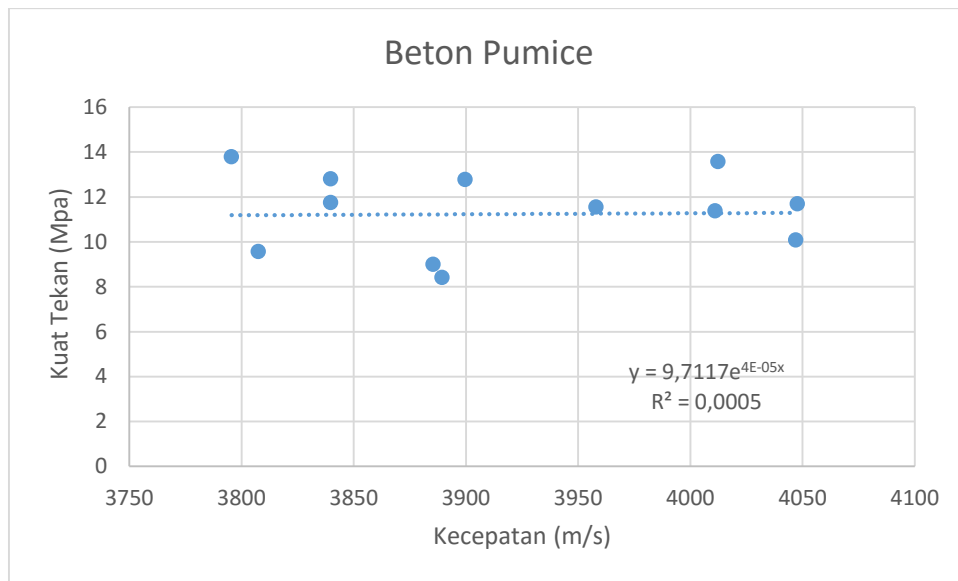
Sumber: Hasil Penelitian



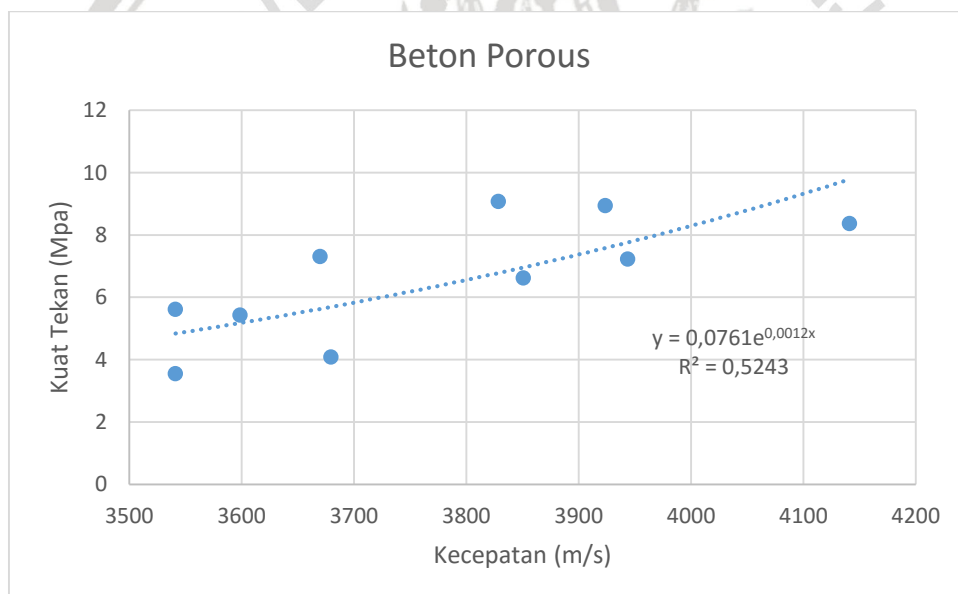
Gambar 4.14 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Normal



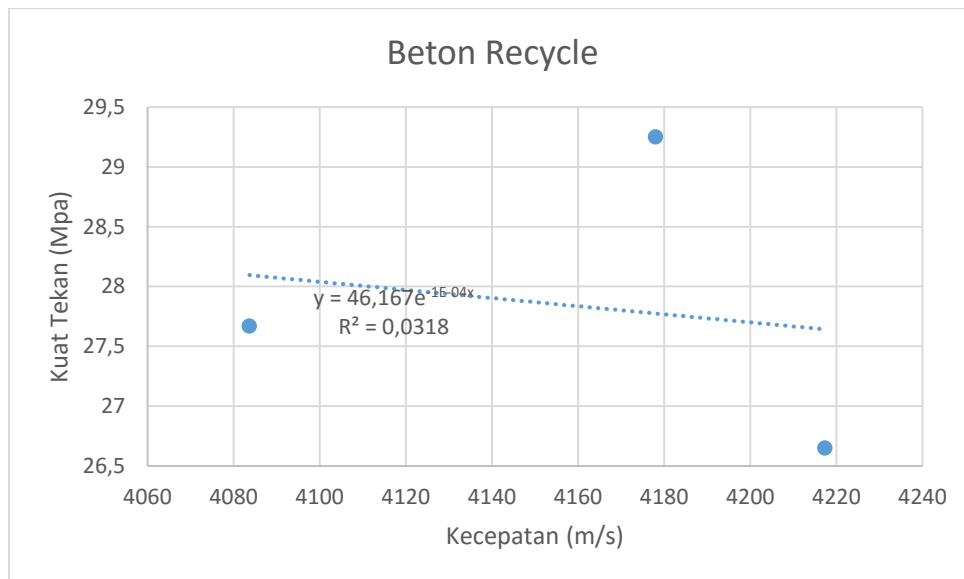
Gambar 4.15 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Fiber



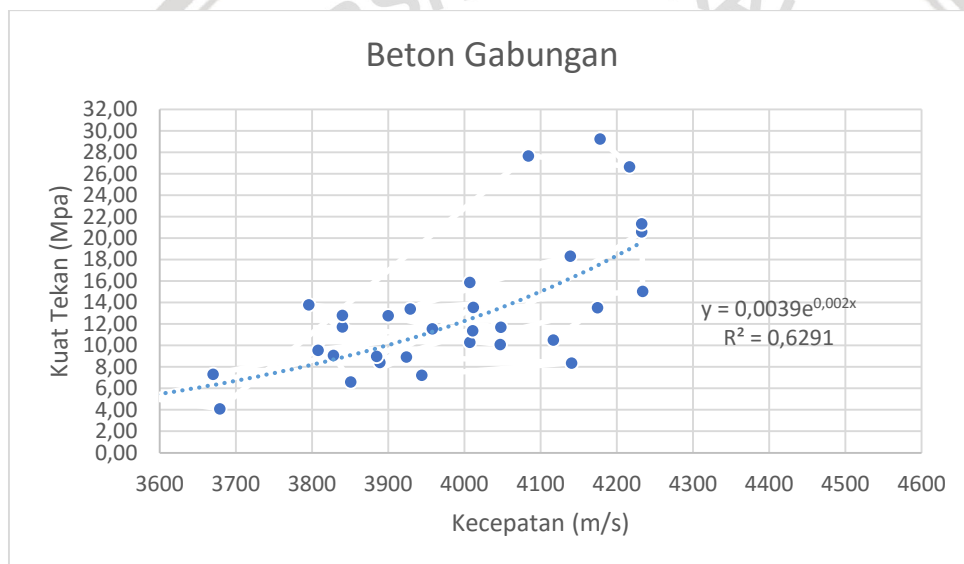
Gambar 4.16 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Pumice



Gambar 4.17 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Porous



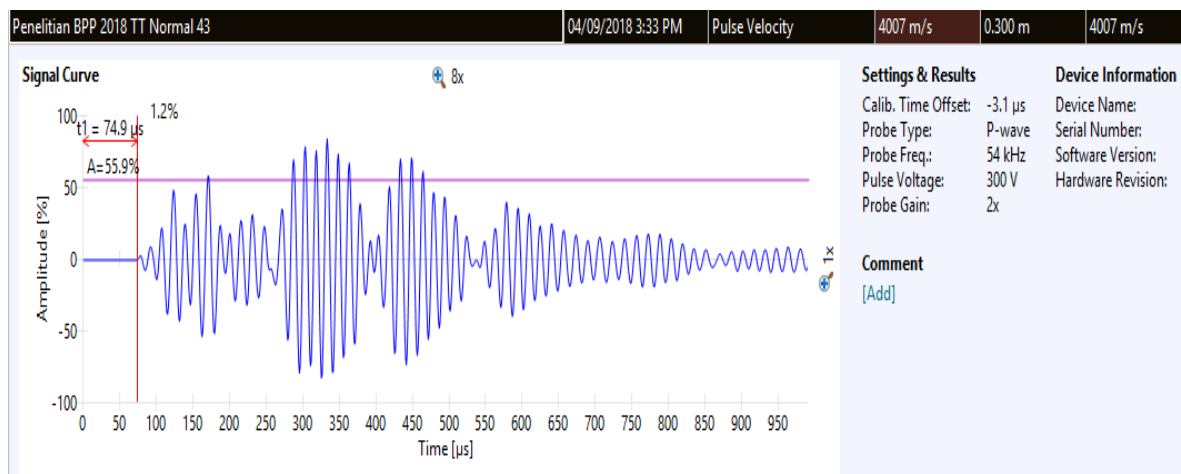
Gambar 4.18 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Recycle



Gambar 4.19 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Gabungan

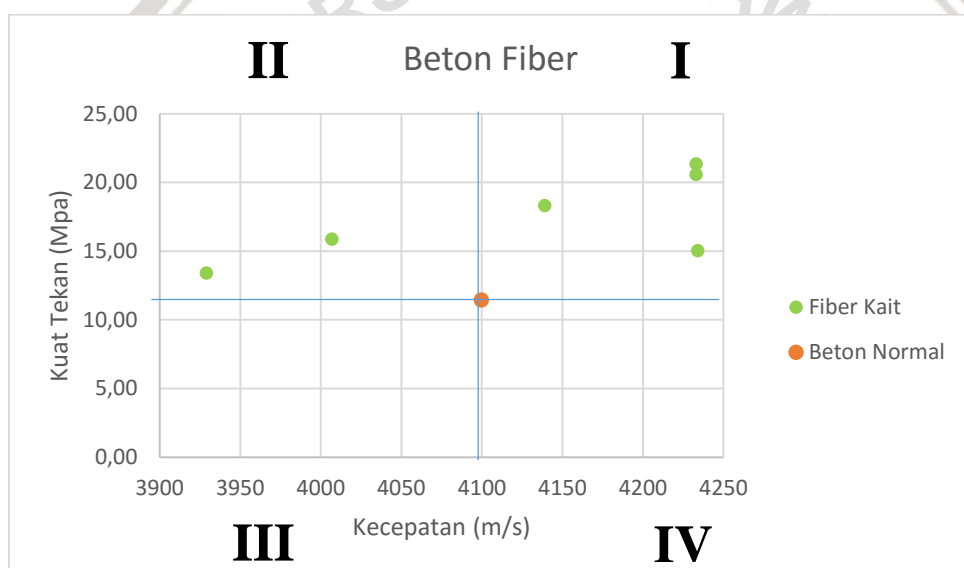
4.5 Pengambilan Sampel Beton Acuan

Pada penelitian ini kemudian diambil sampel beton yang akan dijadikan sebagai beton acuan dalam menentukan kualitas beton berdasarkan karakteristik gelombangnya. Sampel yang dijadikan acuan yaitu beton normal sampel silinder diameter 15 cm.

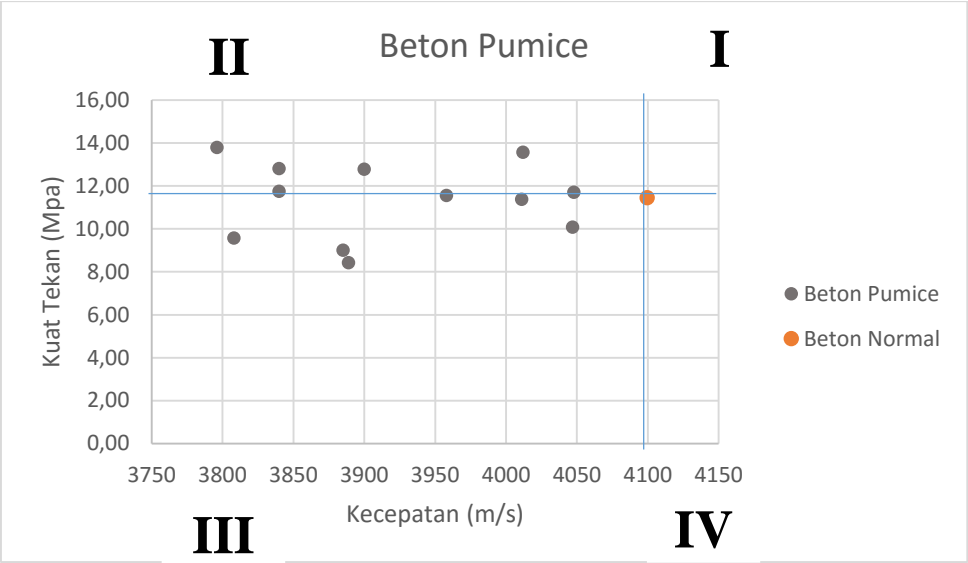


Gambar 4.20 Contoh Pengambilan Parameter Kecepatan Beton Acuan

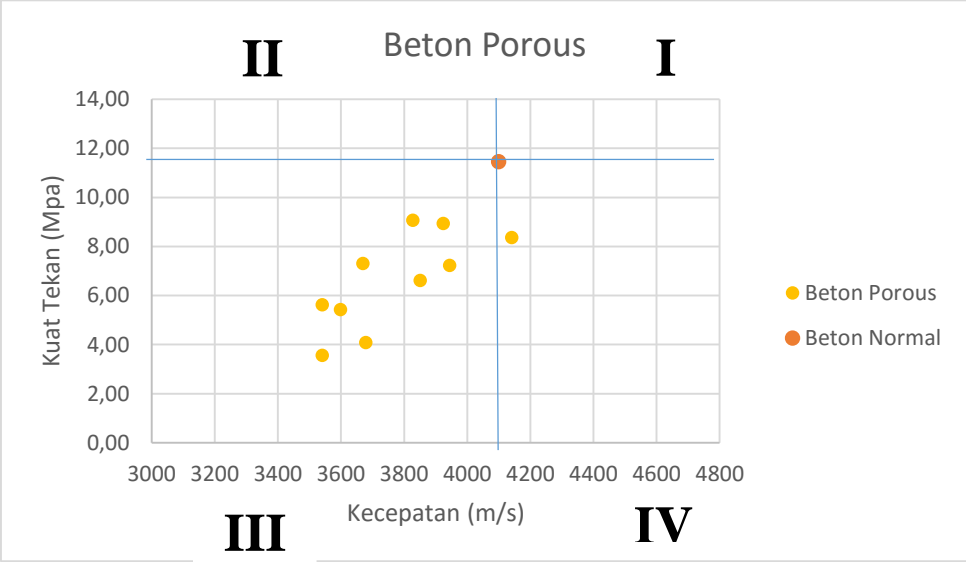
4.6 Hubungan Parameter Gelombang dan Kuat Tekan Antara Berbagai Macam Agregat dengan Beton Acuan



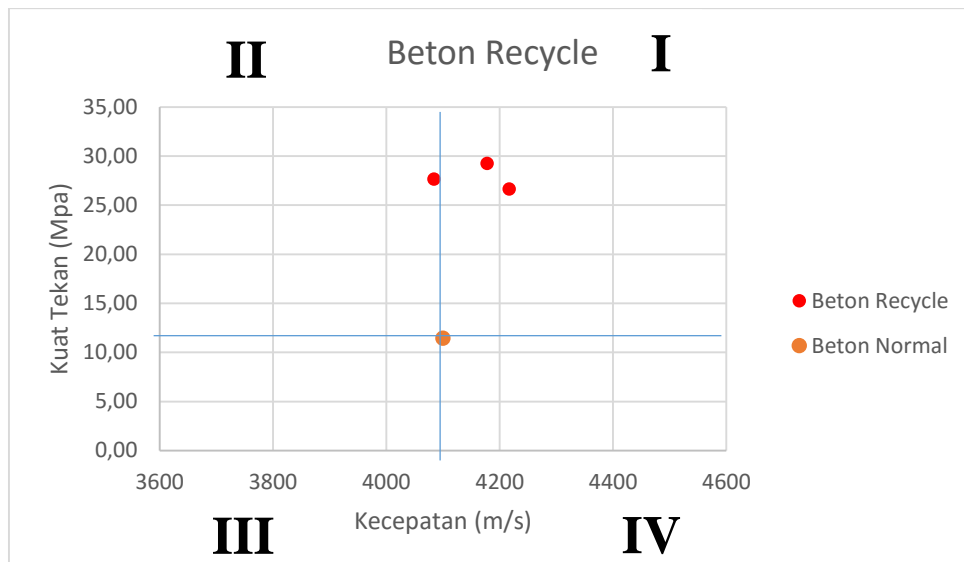
Gambar 4.21 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Fiber dan Beton Acuan



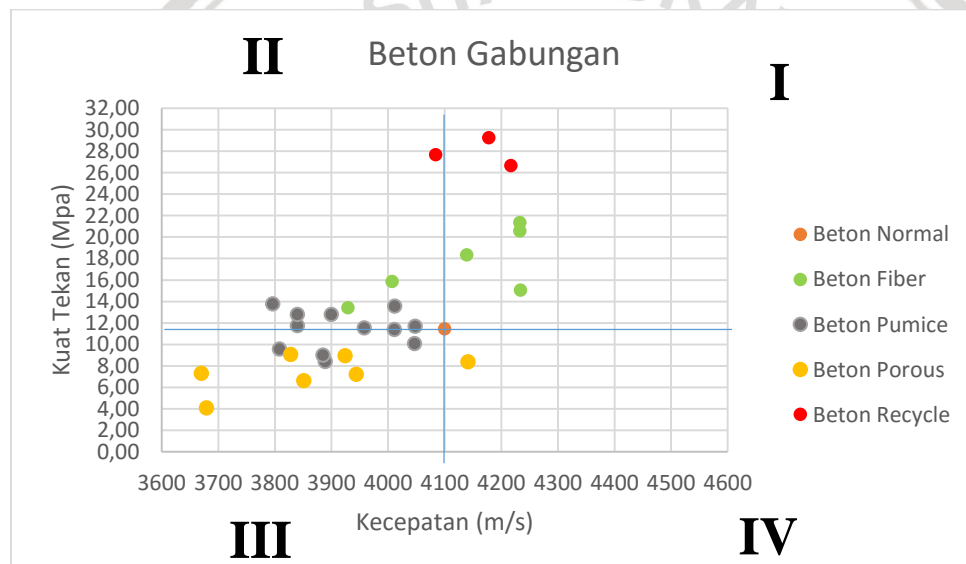
Gambar 4.22 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Pumice dan Beton Acuan



Gambar 4.23 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Poraus dan Beton Poraus



Gambar 4.24 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton *Recycle* dan Beton Recycle



Gambar 4.25 Hubungan Kecepatan dan Kuat Tekan Pada Beton Gabungan

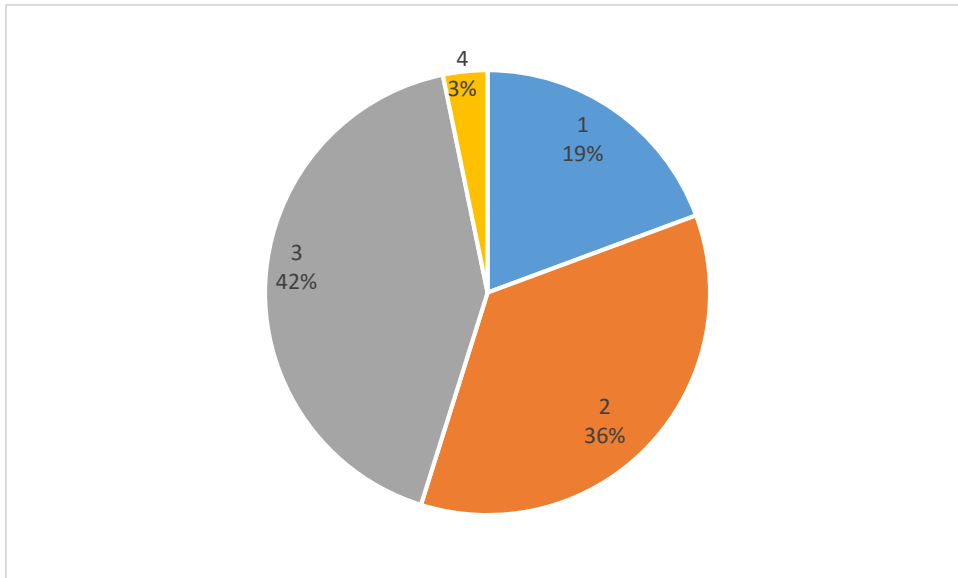
Sumber: Hasil Penelitian

Selanjutnya pada gambar 4.21 – 4.24 dilakukan pembagian daerah sebaran data terhadap sampel yang dijadikan acuan. Sampel tersebut diambil dari sampel beton normal. Sampel acuan tersebut membagi daerah sebaran data menjadi 4 kuadran dengan masing-masing kondisi yaitu sebagai berikut:

- Kuadran I: Kuat tekan > Kuat tekan acuan; kecepatan > kecepatan acuan
- Kuadran II: Kuat tekan > Kuat tekan acuan; kecepatan < kecepatan acuan

- Kuadran III: Kuat tekan < Kuat tekan acuan; kecepatan < kecepatan acuan
- Kuadran IV: Kuat tekan < Kuat tekan acuan; kecepatan > kecepatan acuan

Dari pembagian tersebut dapat dicari prosentase jumlah data yang berada pada masing-masing kuadran seperti pada gambar 4.26



Gambar 4.26 Prosentase Sebaran Data di Setiap Kuadran

Sumber: Hasil Penelitian

Dari gambar 4.26 didapatkan bahwa sebaran data untuk kecepatan (PV) lebih dominan di kuadran III yaitu sebesar 42%. Kemudian 36% berada pada kuadran II, kuadran I sebesar 19 % dan kuadran IV sebesar 3%. Masing-masing beton terdapat pada kuadran yang berbeda.

Untuk beton porous sendiri rata-rata terdapat di kuadran III yaitu mempunyai kecepatan lebih rendah dibanding dengan beton lainnya. Cepat rambat beton porous rendah hal ini dikarenakan beton variasi porous mempunyai banyak rongga sehingga kerapatannya rendah dan kehilangan energi lebih besar, hal ini mengakibatkan cepat rambat pada beton porous rendah. Hal ini membuktikan bahwa pada gelombang akan merambat lebih cepat pada sampel beton yang memiliki kerapatan yang tinggi. Pada beton yang memiliki rongga udara, maka akan terjadi difraksi gelombang pada sekitar rongga tersebut sehingga menyebabkan kecepatan (PV) semakin kecil karena jalur rambatannya yang berubah dari yang semula merupakan garis lurus antar pusat-pusat dari transduser.

Sedangkan untuk beton variasi pumice rata-rata berada pada kuadran II, yaitu cepat rambatnya lebih kecil dibanding cepat rambat beton acuan. Hal ini juga dikarenakan beton variasi pumice mempunyai banyak rongga sehingga mempunyai kerapatan yang rendah, hal ini mengakibatkan kehilangan energi yang besar maka cepat rambat pada beton variasi pumice lebih rendah dibandingkan dengan beton acuan yaitu beton normal. Namun pada beton variasi pumice beberapa sampel mempunyai kuat tekan lebih tinggi dibanding dengan beton acuan yaitu beton normal, hal ini dikarenakan adanya pengaruh fiber kaleng pada campuran beton. Adanya fiber kaleng akan mempengaruhi kuat tekan beton. Kualitas beton akan semakin baik dengan mendapatkan nilai kuat tekan yang lebih tinggi walupun tidak berpengaruh banyak.

Untuk beton dengan variasi fiber rata-rata berada pada kuadran I yang mempunyai cepat rambat yang lebih tinggi dibanding dengan beton acuan atau beton normal. Dan juga mempunyai cepat rambat yang lebih tinggi dibanding dengan variasi beton lainnya. Hal ini dikarenakan beton variasi fiber mempunyai sedikit rongga sehingga kehilangan energi rendah maka kerapatannya tinggi sehingga menghasilkan cepat rambat yang tinggi dibanding beton normal atau beton acuan.

Sedangkan beton dengan variasi recycle rata-rata berada pada kuadran I yang mempunyai cepat rambat yang lebih tinggi dibanding dengan beton acuan atau beton normal. Dan juga mempunyai cepat rambat yang lebih tinggi dibanding dengan variasi beton lainnya. Hal ini dikarenakan beton variasi recycle mempunyai sedikit rongga sehingga kehilangan energi rendah maka kerapatannya tinggi sehingga menghasilkan cepat rambat yang tinggi dibanding beton normal atau beton acuan.

Terlihat bahwa beberapa sampel memiliki kuat tekan yang jauh lebih rendah dibanding kuat tekan aktual rata-rata beton acuan yaitu beton normal. Hal tersebut dapat disebabkan karena adanya kesalahan prosedur pengujian atau pada saat pembacaan dial uji tekan pada sampel tersebut. Faktor-faktor lain yang mempengaruhi hasil pengujian UPV antara lain ukuran, tipe, dan kandungan dari agregat dan semen, rasio air-semen, serta kelembaban dari benda uji.

Ketidakteraturan hasil pengukuran kecepatan serta kuat tekan aktual yang lebih kecil dari kuat tekan rencana tersebut membuktikan bahwa sebagian besar benda uji beton pada penelitian ini memiliki homogenitas yang rendah. Kemungkinan penyebabnya antara lain adanya rongga serta susunan agregat yang tidak seragam, yang merupakan faktor

penting penunjang kekuatan dari beton. Pola kerapatan dan susunan agregat yang berbeda menyebabkan pola difraksi dan refleksi yang berbeda pula, sehingga akan mempengaruhi besarnya energi yang terbaca pada transduser. Hal ini menjadi salah satu kendala dalam penelitian ini yaitu belum dapat memastikan keseragaman dari komposisi dan susunan agregat serta kerapatan aktual dari benda uji yang diteliti.



BAB V

PENUTUP

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil penelitian ini dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada beton variasi fiber dengan mutu beton rencana 17 Mpa memiliki kuat tekan sebesar 17,432 Mpa. Beton variasi fiber memiliki nilai kuat tekan yang lebih besar dibandingkan dengan beton normal yang memiliki nilai kuat tekan sebesar 11,45 Mpa, hal ini dikarenakan adanya fiber pada campuran beton yang menambah kuat tekan pada beton walaupun nilainya tidak signifikan. Untuk kecepatan pada beton fiber lebih besar dibanding beton normal, hal ini dikarenakan rongga didalam beton fiber lebih sedikit yang membuat kerapatan pada beton fiber lebih tinggi dibanding dengan beton normal. Hal ini menyebabkan kehilangan energi pada beton fiber lebih sedikit yang membuat kecepatan pada beton fiber lebih tinggi dibanding dengan beton normal. Adanya penambahan fiber kaleng juga berpengaruh pada kuat tekan dan kecepatan beton dikarenakan fiber kaleng terbuat dari material baja yang disalut timah yang membuat modulus elastisitasnya tinggi. Dari hasil pengujian kuat tekan dan UPV didapatkan hubungan yang cukup kuat antara kuat tekan dengan kecepatan (PV) pada beton fiber dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,5162.
2. Pada beton variasi pumice dengan mutu beton rencana 17 Mpa memiliki kuat tekan sebesar 11,367 Mpa. Beton variasi pumice memiliki nilai kuat tekan yang lebih kecil dibandingkan dengan beton normal yang memiliki nilai kuat tekan sebesar 11,45 Mpa, hal ini dikarenakan adanya campuran agregat pumice yang ringan dan bersifat rapuh yang dapat mempengaruhi kuat tekan dan saat pencampuran material beton distribusi bahan yang tidak merata dikarenakan sifat batuan apung yang cenderung naik ke permukaan. Untuk kecepatan pada beton pumice lebih kecil dibanding beton normal, hal ini dikarenakan rongga didalam beton pumice lebih banyak yang membuat kerapatan pada beton pumice lebih kecil dibanding dengan beton normal. Hal ini menyebabkan kehilangan energi pada beton pumice lebih besar yang membuat kecepatan pada beton pumice lebih rendah dibanding dengan beton normal. Dari hasil pengujian kuat tekan dan UPV didapatkan hubungan antara kuat tekan dengan kecepatan (PV) pada beton pumice dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,0005. Hal ini membuktikan bahwa hubungan antara kuat tekan dan

kecepatan pada beton pumice tidak begitu erat hal ini dikarenakan karakteristik dari batuan pumice yang memiliki banyak rongga yang berbentuk seperti pori-pori yang tersebar tidak merata diseluruh bagian batu yang menyebabkan energi yang ada di beton tersebut tersebar tidak merata dan dibuktikan dengan nilai koefisien determinasi R^2 yang didapat sangat rendah.

3. Pada beton variasi porous dengan mutu beton rencana 14 Mpa memiliki kuat tekan sebesar 6,377 Mpa. Beton variasi porous memiliki nilai kuat tekan yang lebih kecil dibandingkan dengan beton normal yang memiliki nilai kuat tekan sebesar 11,45 Mpa , hal ini dikarenakan saat pengujian kuat tekan ada beberapa kendala saat dilakukan *capping* permukaan sampel beton yang tidak rata. *Capping* yang terpasang pada permukaan beton hanya terkena pada bagian agregat pada sisi-sisi tertentu saja. Kondisi ini dapat menyebabkan gaya tekan yang diterima tidak bisa merata secara maksimal pada seluruh luasan permukaan. Untuk kecepatan pada beton porous lebih kecil dibanding beton normal, hal ini dikarenakan rongga didalam beton porous lebih banyak yang membuat kerapatan pada beton porous lebih rendah dibanding dengan beton normal. Hal ini menyebabkan kehilangan energi pada beton porous lebih banyak yang membuat kecepatan pada beton porous lebih rendah dibanding dengan beton normal. Dari hasil pengujian kuat tekan dan UPV didapatkan hubungan yang cukup kuat antara kuat tekan dengan kecepatan (PV) pada beton fiber dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,5243.
4. Pada beton variasi recycle dengan mutu beton rencana 20 Mpa memiliki kuat tekan sebesar 27,857 Mpa. Beton variasi recycle memiliki nilai kuat tekan yang lebih tinggi dibandingkan dengan beton normal yang memiliki nilai kuat tekan sebesar 11,45 Mpa , hal ini dikarenakan pada beton recycle menggunakan agregat kasar mutu tinggi, sehingga kuat tekan yang didapatkan tinggi. Untuk kecepatan pada beton recycle lebih besar dibanding beton normal, hal ini dikarenakan rongga didalam beton recycle lebih sedikit yang membuat kerapatan pada beton recycle lebih tinggi dibanding dengan beton normal. Hal ini menyebabkan kehilangan energi pada beton recycle lebih sedikit yang membuat kecepatan pada beton recycle lebih tinggi dibanding dengan beton normal. Dari hasil pengujian kuat tekan dan UPV didapatkan hubungan antara kuat tekan dengan kecepatan (PV) pada beton recycle dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,0318. Hal ini membuktikan bahwa hubungan antara kuat tekan dan kecepatan pada beton recycle tidak begitu erat dikarenakan

penggunaan agregat beton recycle mutu tinggi tidak terlalu berpengaruh dengan kerapatan pada beton. Beton recycle walaupun menggunakan mutu tinggi tetap saja penggunaan daur ulang yang tidak sebaik beton aslinya, maka juga akan mempengaruhi kerapatan pada beton, hal ini dibuktikan dengan nilai koefisien determinasi R^2 yang didapat.

Pada pola sebaran data yang dominan di mana kuat tekan relatif lebih kecil maka kecepatan akan relatif lebih kecil (kuadran III), yaitu dengan prosentase jumlah sampel sebesar 42% (PV). Kemudian untuk sampel dengan kuat tekan yang relatif rendah dan kecepatan relatif besar (kuadran II) memiliki prosentase 36% (PV). Hal ini dikarenakan perambatan gelombang akan memiliki kecepatan yang lebih cepat pada beton yang memiliki kerapatan tinggi yang kemungkinan besar kuat tekannya juga tinggi. Sedangkan untuk beton variasi fiber belum memberikan pola sebaran data yang konsisten dalam hubungannya dengan kuat tekan. Faktor penyebabnya yaitu ketidakseragaman komposisi dan susunan agregat yang menimbulkan pembacaan kecepatan yang berbeda-beda meskipun dalam satu sampel yang sama.

5.2 SARAN

Menurut penelitian terhadap benda uji silinder dengan berbagai macam jenis agregat, yang menggunakan alat UPV maka terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya, yaitu:

1. Diperlukan adanya penambahan jumlah sampel pada masing-masing variasi beton agar regresi dan korelasi yang telah didapat dapat digunakan secara umum.
2. Beberapa jenis beton mempunyai nilai koefisien determinasi R^2 yang sangat kecil yang belum bisa digunakan sebagai acuan maka perlu disempurnakan.
3. Diperlukan kontrol yang lebih baik terhadap proses pencampuran beton dan berbagai macam komposisi material agar terhindar dari faktor-faktor yang tidak diinginkan.
4. Diperlukan kestabilan transduser dan berapa banyak cairan couplant saat pengujian UPV berlangsung.

DAFTAR PUSTAKA

- Wedhanto, S. (2015). Penggunaan Metode Ultrasonic Pulse Velocity Test Untuk Memperkirakan Kekuatan dan Keseragaman Mutu Beton K200 Secara Non Destruktif. *Jurnal Bangunan*, 20, 43-52.
- B. Sanish, K & Santhanam, Manu. (2012). Characterization of Strength Development of Concrete Using Ultrasonic Method. Makalah dalam *18th World Conference on Non-destructive Testing*, Durban, South Africa, 16-20 April 2012.
- International Atomic Energy Agency, Vienna. (2002). *Guidebook on non-destructive testing of concrete structures, Training Course Series No. 17*.
- Malhotra, V.M. & Carino, N.J. (2004). *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete*. Boca Raton: CRC Press.
- PROCEQ. (2014). *Pundit PL-200 and PE Ultrasonic Training*. Switzerland : Proceq.
- Yulian, Albertus Eky. (2017). Analisis Kerapatan Beton Dengan Menggunakan Cepat Rambat Dan Transmission Time Pada Alat UPV (Ultrasonic Pulse Velocity). *Jurnal Mahasiswa Jurusan Teknik Sipil 1 (1)*, pp. 106-116 2018
- Neville & Brooks. (2010). *Concrete technology*, 442.
- Nugroho, Eko Hindaryanto. 2010. “ Analisis Porositas dan Permeabilitas Beton dengan Bahan Tambah Fly Ash untuk Perkerasan Kaku (Rigid Pavement)”. Skripsi. FT, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Brawijaya Malang
- Mattacchione, Angelo & Mattacchione, Livia. (1995). Correlation Between 28-Day Strength and Density. *Concrete International*. XVII (3): 37-41.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Sampel Beton Normal



Lampiran 2 Variasi Jenis Beton Fiber



Lampiran 3 Variasi Jenis Beton Pumice



Lampiran 4 Variasi Jenis Beton Porous



Lampiran 5 Variasi Jenis Beton *Recycle*



Lampiran 6 Proses Pengujian Pada Beton Porous Menggunakan UPV



Lampiran 7 Proses Pengujian Menggunakan UPV



Lampiran 8 Proses Pemberian Couplant pada Transmitter dan Receiver



Lampiran 9 Proses Pembacaan Cepat Rambat pada UPV



